INVESTIGACION y CIENCIA

EROSION Y FORMACION DE LAS MONTAÑAS

ORIGEN DEL HOMBRE MODERNO

REVOLUCION EN LA QUIMICA DE FARMACOS

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

HISTORIA DE LA FOTOGRAFIA



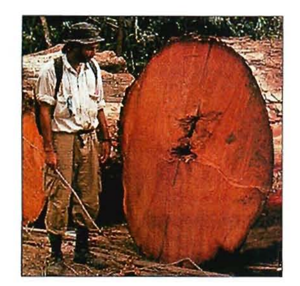
JUNIO 1997
800 PTAS.



Junio de 1997 Número 249



4



La controvertida gestión de la pluviselva tropical

Richard E. Rice, Raymond E. Gullison y John W. Reid

Para preservar las magníficas y valiosas pluviselvas de nuestro planeta, muchos expertos han adoptado como remedio gestor el criterio de la viabilidad, mediante la sustitución de los árboles recolectados con nuevos plantones de la misma especie. Los autores explican por qué esta estrategia aparentemente lógica suele fracasar.

12



Los agujeros negros y la paradoja de la información

Leonard Susskind

Si un libro desaparece en un agujero negro, ¿se destruye su información? Stephen W. Hawking ha argumentado que sí, pero esta respuesta choca con los principios de conservación y la teoría cuántica. Como telón de fondo, se trata de la posible fusión de la mecánica cuántica y la teoría de la gravitación en una teoría cuántica de la gravedad basada en la teoría de cuerdas.

20



De Africa ¿una... y otra vez?

Ian Tattersall

La historia de la evolución humana parecía bastante simple: después de haber evolucionado en Africa, una intrépida especie de homínido emigró hacia el Viejo Mundo y dio lugar a la gente actual. Pero el análisis detenido de los registros arqueológico y paleontológico de numerosas excavaciones sugiere que los seres humanos emigraron de Africa varias veces.



46

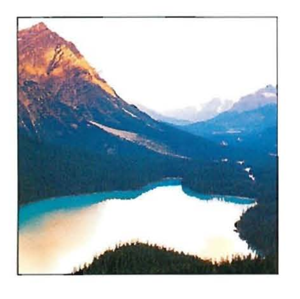


Química combinatoria y nuevos fármacos

Matthew J. Plunkett y Jonathan A. Ellman

Utilizando el poder creativo de la selección darwinista dentro de un tubo de ensayo, los químicos pueden ahora descubrir nuevos medicamentos, impensables de haberse limitado a los procedimientos habituales en la industria farmacéutica. El secreto se esconde en la química combinatoria, un proceso que les permite producir millones de moléculas candidatas de forma rápida y sistemática.

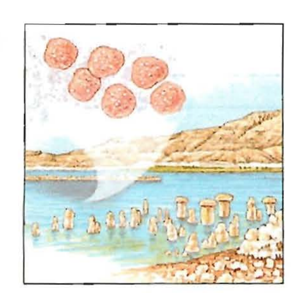
52



La erosión, constructora de montañas

Nicholas Pinter y Mark T. Brandon

¿Qué clase de titánicas fuerzas requiere la formación de una montaña? En nuestra mente aparecen erupciones volcánicas y potentes colisiones entre placas tectónicas que levantan la tierra hacia el cielo. Paradójicamente, la génesis de las montañas depende en igual medida del poder más gradualmente destructivo del viento y el agua.

60 

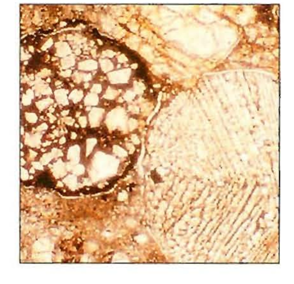
Extremófilos
Michael T. Madigan y Barry L. Marrs

Los biólogos han descubierto un valioso zoo de microorganismos que medran en lugares infernalmente calurosos, fríos, ácidos, alcalinos o salobres. Estos extremófilos fabrican una serie de enzimas que les protegen de las lesiones que les pueden ocasionar las condiciones ambientales en las que viven, enzimas que han encontrado aplicación en un sinnúmero de procesos industriales.

68 

La invención de la fotografía, recuperada
Jean-Louis Marignier y Michel Ellenberger

Los historiadores de la fotografía hacen justicia a este inventor genial, pero valoran incorrectamente la originalidad de su aportación y subestiman las dificultades que hubo de afrontar. La reconstrucción experimental de los procedimientos de Niépce, fundada en la interpretación de sus cartas, pone de manifiesto el genio edisoniano del creador de la fotografía.

76 

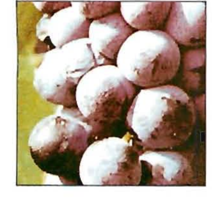
Actividad magmática en los asteroides
Ignacio Casanova y Jordi Llorca

De las más de 10.000 toneladas de material extraterrestre que cae anualmente en nuestro planeta, sólo una fracción minúscula atraviesa la atmósfera sin reducirse a polvo: los meteoritos. Estos dan fe de episodios magmáticos ocurridos en los asteroides hace más de 4500 millones de años y aportan una valiosa información sobre el origen y evolución del sistema solar.

SECCIONES

3 HACE...

30 PERFILES

32  CIENCIA Y SOCIEDAD

Maduración de la uva.

44 DE CERCA

84 TALLER Y LABORATORIO

87 JUEGOS MATEMÁTICOS

Un poco de oscuridad.

90 LIBROS

96 IDEAS APLICADAS



Portada: Jean-Louis Marignier

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
4	Raymond E. Gullison
5	Michael M. Stewartt (*arriba*); Robin B. Foster (*abajo*)
6-7	Jennifer C. Christiansen (*izquierda*); cortesía de Compton Tucker, NASA (*derecha*)
8	(*de arriba a abajo*) Michael Fogden; Norman Owen Tomalin (*segunda y tercera*); Joseph Van Wormer; Richard G. Fairbanks; Tui de Roy y D. Lyons
9	Jennifer C. Christiansen
12-13	Yan Nascimbene
14-15	Bryan Christie (*superior izquierda*); Yan Nascimbene
16-17	Bryan Christie
20-21	D. Finnin y J. Beckett, Museo Americano de Historia Natural
22	Robert Campbell, cortesía de Meave Leakey (*arriba*); Craig Chesek, Museo Americano de Historia Natural (*abajo*)
23	Willard Whitson (*arriba*); Don McGranaghan (*abajo*)
24	Cortesía de Russell Ciochon (*arriba*); Javier Trueba (*abajo*)
25	Cortesía de Russell Ciochon (*arriba izquierda*); de Eric Delson (*derecha*); Javier Trueba y Juan-Luis Arsuaga (*abajo izquierda*) y Laurie Grace (*derecha*)
26-27	Laurie Grace/Jana Brenning
46-47	Charles O'Rear
48-49	Jared Schneidman Design
50	Charles O'Rear (*arriba*); cortesía de W. Clark Still (*abajo*)
51	Cortesía de Peter G. Schultz
52-53	Richard Sisk, *Panoramic Images*
54	Proyecto Geosfera/Tom Van Sant (*arriba*); Laurie Grace (*abajo*)
55	Laurie Grace (*arriba*); Gerald French (*abajo*)
56	Clyde H. Smith
57	Galen Rowell
60-61	Roberto Osti
62	NASA (*izquierda*); Thomas D. Brock (*arriba y derecha*)
63	Michael Milstein (*izquierda*); cortesía de James T. Staley
64	(*de arriba abajo*) Rod Catanach; Woods Hole Oceanographic Institution; Karl O. Stetter
65	Jennifer C. Christiansen
68	Museo Niépce
69	Harry Ransom Center (*arriba*); PLS/Jean-Louis Marignier (*abajo*)
70-71	PLS/Jean-Louis Marignier
73	Col. Janine Niépce
74-75	PLS/Jean-Louis Marignier
77-83	Ignacio Casanova y Jordi Llorca
84	Patricia J. Wynne
85	Patricia J. Wynne; Johnny Johnson (*gráfica*)
87-89	Bryan Christie

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Joandomènec Ros: *La controvertida gestión de la pluviselva tropical*; Juan Pedro Campos: *Los agujeros negros y la paradoja de la información*; Juan Luis Arsuaga: *De Africa ¿una... y otra vez?*; Jorge Gálvez y Ernesto Estrada: *Química combinatoria y nuevos fármacos*; Sònia Ambròs: *La erosión, constructora de montañas*; Jordi Barbé García: *Extremófilos*; Luis Bou: *La invención de la fotografía, recuperada* y *Juegos matemáticos*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; J. Vilardell: *Hace...*, *Taller y laboratorio* e *Ideas aplicadas*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
Carmen Lebrón Pérez
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; Philip M. Yam, *News Editor*; Ricki L. Rusting y Timothy M. Beardsley, *Associate Editors*; John Horgan, *Senior Writer*; Corey S. Powell, *Electronic Features Editor*; W. Wayt Gibbs; Kristin Leutwyler; Madhusree Mukerjee; Sasha Nemecek; David A. Schneider; Gary Stix; Paul Wallich; Glenn Zorpette; Marguerite Holloway, *Contributing Editor*
PRODUCTION Richard Sasso
PUBLISHER Joachim P. Rosler
CHAIRMAN AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	8.800	16.000
Extranjero	11.000	20.400

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pesetas
Extraordinario: 1.000 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

—En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. (93) 321 21 14
Fax (93) 414 54 13



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

UN COMPETIDOR DEL PLOMO. «Los plásticos le están comiendo el terreno al plomo en aplicaciones hasta ahora exclusivas de éste. En la industria química puede sustituirlo en los revestimientos de depósitos y en las conducciones y en la industria eléctrica en las vainas de cables conductores. Para las pinturas ya se están desarrollando pigmentos que sustituirán al tradicional albayalde. El vidrio y el caucho ofrecen muchas de las ventajas de la naturaleza inerte del plomo y ya se emplean para funciones para las que antes el plomo era el único material que se tenía en cuenta.»

NUEVO FUNGICIDA. «Se ha desarrollado un fungicida agrícola derivado del petróleo y el azufre. Se trata de un producto similar al látex que fija las sustancias químicas de tal modo que a éstas no las erosiona ni la lluvia ni el rocío y así aumenta al máximo sus efectos letales sobre plagas y enfermedades. Una vez rociado y seco, el producto forma una red microscópica que sólo puede eliminarse raspando, por descomposición del mismo producto o porque éste se dilate a causa del crecimiento.»

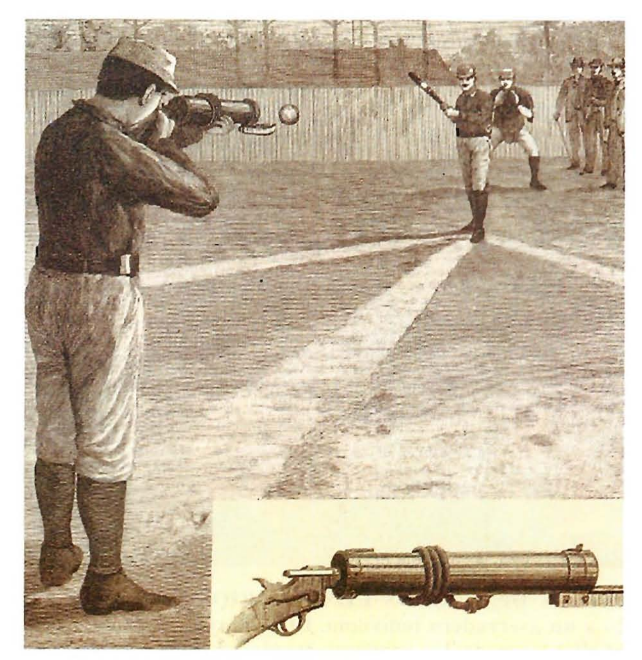
...cien años

LICUACIÓN DEL FLÚOR. «El eminente químico profesor James Dewar acaba de conseguir la licuación del gas flúor a una temperatura de −185 ºC. Obtuvo un movedizo líquido amarillo carente de actividad química. Desde su aislamiento por M. Moissan en 1887, el flúor ha despertado un gran interés. Pero frustraba todos los esfuerzos de los químicos para estudiarlo, ya que sus afinidades químicas eran tantas y tan acusadas, que, cuando se extraía de una combinación, al instante se combinaba con alguna otra sustancia con la que entrase en contacto. A causa de esta dificultad, se planteaba cierta incertidumbre acerca de su naturaleza elemental.»

EL CINAMOTÓGRAFO. «La popularidad del arte de la fotografía cinética, o cronofotografía, ha inducido la invención de numerosos aparatos. Una de las cámaras más recientes es la debida a los hermanos Lumière, de París. Entre sus características más importantes destaca un ingenioso dispositivo para generar un movimiento intermitente sin ruedas dentadas ni levas, mientras que por su luminosidad y facilidad de manejo puede emplearse en casi cualquier lugar. La misma cámara puede convertirse en un proyector que arroja imágenes móviles sobre una pantalla.»

CAZA DE BALLENAS. «Dada la escasez de ballenas francas en las aguas septentrionales, Terranova está a punto de seguir el ejemplo de Noruega y hacer de yubartas y rorcuales, que se dice abundan en enorme cantidad en sus costas, el objeto de una persecución sistemática. El director de las pesquerías ha organizado una flota de pequeños vapores, con arpones y lanzas explosivas para llevar adelante su actividad. Si los balleneros de Terranova capturan muchos ejemplares, podría valer la pena tratar de comercializar la carne. Si pudieran vencerse los prejuicios contra su consumo, no hay razones para que el "filete de ballena" no sea bien recibido.»

LANZADOR DE BÉISBOL MECÁNICO. «Presentamos algunas ilustraciones del nuevo rifle de pólvora para lanzar pelotas de béisbol que se probó en la cancha de Princeton los días 8, 9 y 10 de junio. Consiste en un cañón con un tubo arrollado en su torno que contiene un carga de pólvora, que una vez encendida proyecta sus gases tras la pelota y ésta sale despedida. Dos "uñas", dos placas de metal curvas y cubiertas de caucho, sobresalen de la pared del cañón y comunican a la pelota una velocidad de giro sobre sí misma, y es ese giro lo que hace curva la trayectoria de la pelota.»


Nuevo rifle de pólvora para lanzar pelotas de béisbol

...ciento cincuenta años

ASTROFOTOGRAFÍA. «La Real Sociedad de Bohemia ha ocupado últimamente su atención en la combinación del telescopio con la daguerrotipia. Afirma el profesor Christian Doppler que la gran sensibilidad del ojo humano se ve sobrepasada muchos miles de veces por una placa de yoduro de plata. El diámetro de una de las papilas de la retina es del orden de tres milésimas de milímetro, pero en una superficie de una placa de daguerrotipo igual a la de una papila de retina se encuentran más de 40.000 globículos de mercurio. Así, pueden obtenerse imágenes de las estrellas fijas más débiles.»

VELEROS A PRUEBA DE FUEGO. «Un caballero de Glasgow (Escocia) sugiere un método rápido para impedir que los veleros sean pasto de las llamas. Cada nave debe llevar como lastre una cantidad de yeso. Si se declara un incendio en la bodega, al verter ácido sulfúrico diluido sobre el yeso, se generaría tal cantidad de gas ácido carbónico [dióxido de carbono] que su efecto sería extinguir las llamas.»

La controvertida gestión de la pluviselva tropical

Lo que menos podría esperarse: las medidas acometidas para equilibrar la explotación sostenible no consiguen reconciliar la conservación de las especies con la explotación de maderas tropicales

Richard E. Rice, Raymond E. Gullison y John W. Reid

Para quienes hemos dedicado nuestra carrera al mantenimiento de la biodiversidad y del esplendor natural de los bosques del planeta, la incesante destrucción de la pluviselva tropical es un motivo de continua inquietud. En esos lugares de vida exuberante medran una flora y una fauna variopintas, que la ciencia apenas conoce en una pequeña fracción. Pese a ello, la deforestación tropical avanza inexorable y a una escala desmesurada. Mucho tiene en ello que ver la tala generalizada de maderas preciosas.

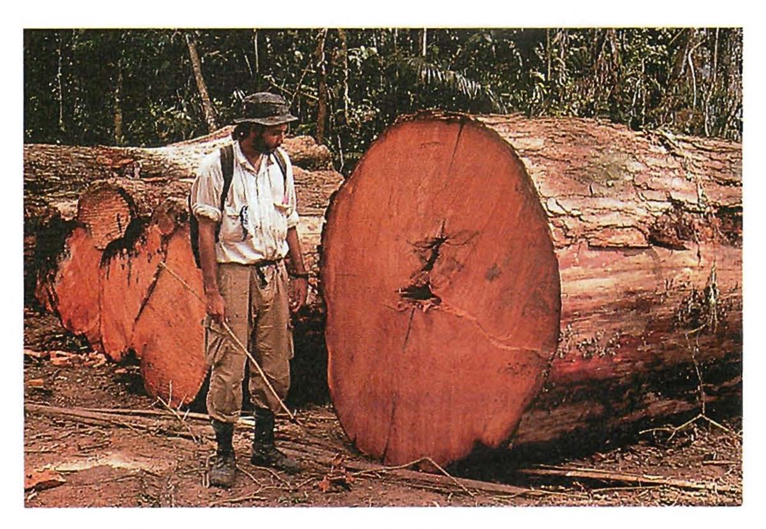
En su empeño por invertir esa fatídica tendencia, los conservacionistas se han guiado por la tesis aceptada de una explotación maderera reglamentada, una suerte de transacción entre la conservación absoluta y la tala libre. La gestión forestal es una estrategia atractiva porque, en teoría, armoniza los intereses económicos del sector con las exigencias de la conservación. En la práctica, la gestión viable requiere moderación en la tala de árboles y, a la vez, promover su sustitución mediante la plantación de pimpollos o la regeneración natural de las especies explotadas.

La mayoría de los conservacionistas ven en dicha fórmula una estrategia pragmática para los países que no pueden permitirse el lujo de prescindir del comercio con su riqueza maderera. También nosotros éramos partidarios de esa estrategia hasta hace poco, cuando caímos en la cuenta de que la mayoría de los esfuerzos bienintencionados que en esta dirección efectuaban los partidarios de la conservación, los gestores forestales y los entes de cooperación internacional tenían unas menguadas probabilidades de éxito. Aunque desde entonces ha aumentado nuestra preocupación por la eficacia de la silvicultura viable, nuestra primera desilusión surgió hace siete años, de las experiencias que tuvimos cuando nos propusimos fomentar dichas prácticas en Sudamérica.

Un bosque desencantado

En 1990, la casualidad hizo que dos de nosotros, movidos por un interés común en la conservación de las pluviselvas amazónicas de Bolivia, nos conociéramos en el bar del hotel El Dorado, en el centro de la ciudad de La Paz. Gullison acababa de llegar de la Universidad de Princeton para investigar la ecología del caobo (*Swietenia macrophylla*), la especie más apreciada de la América tropical. Rice estaba a punto de retornar a Washington, después de trabajar con la Institución Smithsoniana en la Reserva de la Biosfera de Beni, situada junto al Bosque de Producción Maderera Permanente de Chimanes, una extensión de medio millón de hectáreas en las tierras bajas de Bolivia. A mediados de los años ochenta, la Organización Internacional de Madereo Tropical seleccionó el Bosque de Chimanes para convertirlo en modelo de una gestión viable. Compartíamos una misma voluntad de que el programa no quedara en agua de borrajas.

Aunque nuestra primera conversación junto a un par de cervezas fue breve, al final de la misma nos habíamos puesto de acuerdo en colaborar en el futuro. Al cabo de un año habíamos conseguido financiación para lo que acabó siendo un estudio de cuatro años. De entrada, Gullison se propuso establecer una gestión ecológica óptima de la explotación de caoba; Rice, por su parte, desarrollar un guión que convenciera a las compañías madereras de la conveniencia, desde el punto de vista económico, de adaptar sus planes de actuación a los principios científicos.



1. TRONCOS DE CAOBOS CENTENARIOS preparados para su traslado a un aserradero boliviano. El madereo del caobo (*Swietenia macrophylla*), una de las maderas tropicales más valiosas (la caoba), se realiza en muchas partes de América Central y del Sur, en concreto en Guatemala, Belice, Bolivia, Perú y Brasil.

Conforme transcurría el tiempo, Gullison y su equipo de campo boliviano avanzaban de manera resuelta en el conocimiento de la ecología del bosque. Comprobaron que los plantones de caobo sólo crecían y prosperaban después de grandes perturbaciones naturales. En la región de Chimanes, los caobos más jóvenes surgían únicamente cerca de ríos en los que las avenidas habían arrasado recientemente las orillas y habían enterrado la vegetación competitiva bajo una gruesa capa de sedimento. En el pasado, tales perturbaciones crearon gran número de áreas dispersas en las que podían crecer los plantones, hasta terminar formando grupos de árboles de edad y tamaño más o menos uniformes. Para el problema que se estaba considerando, este aspecto de la ecología del caobo resultaba alarmante: significaba que el madereo incontrolado arrasaría los bosques más viejos, en los que casi todos los árboles tendrían un tamaño comercial.

Estas preocupaciones se agudizaron al darnos cuenta de que apenas habría sustitución espontánea de los árboles talados, aunque los madereros respetaran el bosque. Los plantones de caobo (y los de algunas otras especies de árboles tropicales) no pueden crecer bajo el dosel umbrío de la selva tropical densa. Al ser improbable que la regeneración natural fuera suficiente, no quedaba más remedio que acudir a la repoblación dirigida para mantener el caobo de manera indefinida.

¿Cómo conseguir una ayuda para ello? En teoría, los madereros podrían crear las condiciones adecuadas, imitadas de las naturales y abriendo grandes claros en el bosque, para el crecimiento espontáneo de los caobos. Pero el esfuerzo sería enorme, y a juzgar por otros intentos de ese mismo tenor ya realizados con anterioridad en zonas distintas, se necesitarían costosas "entresacas" para eliminar la vegetación competidora.





2. BOSQUES TALADOS; el nivel de perturbación que experimentan puede diferir de forma espectacular. Madereros que operaban siguiendo normativas estrictas talaron casi todos los árboles de esta localidad de la isla de Vancouver, Canadá (*arriba*), mientras que sus colegas del sudeste de Bolivia, que trabajan sin apenas supervisión gubernamental, derribaron únicamente la minúscula fracción de selva que contenía la madera comercialmente valiosa (*abajo*).

A la postre, ese empeño por mantener la explotación de caobo podría perturbar tanto el bosque, que los objetivos globales de conservación se verían comprometidos. O lo que es lo mismo, ganar la batalla del caobo supondría perder la guerra de la conservación de la biodiversidad. La percepción de esa aporía nos llevó a plantearnos qué era exactamente lo que buscábamos.

El dinero cuenta

Mientras Gullison descubría las dificultades que entrañaba la regeneración del caobo, Rice llegaba a una conclusión no menos desazonadora: no había incentivos económicos para que las compañías madereras que trabajaban en el Bosque de Chimanes invirtieran en la gestión viable. Conclusión desazonadora, aunque no sorprendente habida cuenta de las tendencias globales; a finales de los ochenta, la gestión viable de la explotación maderera no cubría ni la octava parte del 1 por ciento de los bosques de producción tropicales.

La explotación forestal, tal como se practica en los trópicos, se dedica a una tala rápida de los árboles de mayor valor. El número de especies extraídas puede ser muy bajo, desde una sola (cuando se trata de madera noble, como la caoba), o de hasta 80 o 90 (donde existe demanda de una mayor variedad). Por lo general, las compañías madereras se preocupan poco por la condición de los bosques residuales y no invierten en la regeneración. Se trata de una forma de actuar basada en puras razones económicas. A la hora de decidir si limitan las talas, las empresas deben optar entre dos caminos: talar los árboles inmediatamente y poner los beneficios en circuitos de rendimiento financiero, o demorar la recolección y permitir que el bosque crezca en volumen y valor con el tiempo. A lo que parece, es la economía lo que dicta la decisión.

Si elige la primera opción, la compañía maderera talará sus árboles con la mayor celeridad que pueda, invertirá las ganancias y obtendrá el rendimiento corriente, que puede medirse mediante tasas de interés real o ajustado por la inflación. Puesto que los riesgos son considerables y escaso el capital, las tasas de interés real en los países en vías de desarrollo suelen ser mucho mayores que en los países industriales. Por ceñirnos a Bolivia, en los últimos años las tasas de interés real en cuentas en dólares han sido en promedio del 17 por ciento, en comparación con el 4 por ciento en los Estados Unidos. Las tasas de interés altas son comunes en la mayoría de los países iberoamericanos. Por consiguiente, las compañías que recolectan rápidamente sus activos pueden invertir de inmediato sus beneficios y generar tasas elevadas y continuas de réditos.

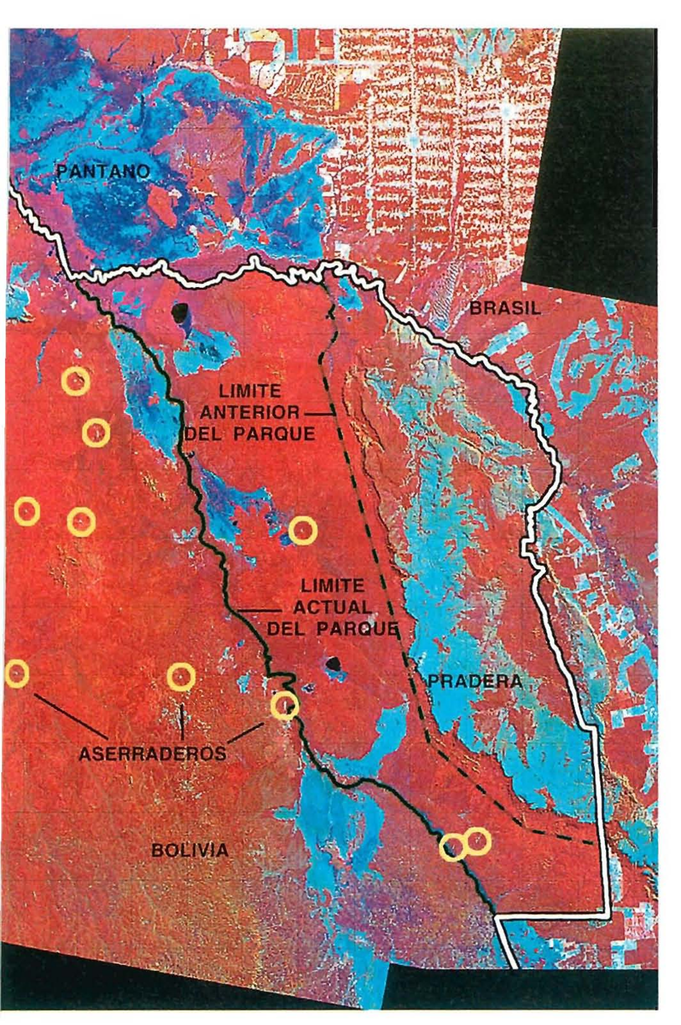


Son pequeños, por contra, los beneficios que se obtienen con el retraso de la tala. De 1987 a 1994, el precio real de la caoba aumentó, en promedio, el 1 por ciento anual, mientras que el crecimiento anual promedio en volumen de los caobos de tamaño comercial no llega al 4 por ciento. Esta combinación de tasas de crecimiento lento y aumentos moderados de precio significa que los caobos (y con ellos la mayoría de las especies comerciales de los trópicos americanos) aumentan anualmente de valor, como máximo, en un 4 o 5 por ciento..., que viene a ser lo mismo que se ganaría con una inversión pacata en los Estados Unidos y mucho menos de lo que rinden los réditos competitivos en Bolivia.

Añádase a ello el riesgo que corre el valor de los árboles que se dejan crecer. Este se esfumaría si el viento, el fuego o las enfermedades destruyeran los troncos o si, en el futuro, el gobierno restringiera el madereo. Por tanto, la elección de dejar que el caobo crezca equivale a una inversión bastante insegura, una inversión que, todo lo más, proporcionaría un rendimiento igual al que se obtendría si se talaran los árboles y se colocaran los beneficios a buen recaudo en un banco. Como cualquier empresario, siempre renuente a efectuar inversiones arriesgadas en países en vías desarrollo si no se le ofrecen atractivos rendimientos, los madereros prefieren talar sus árboles con la mayor rapidez posible.

Después de efectuar un análisis pormenorizado de la economía de la explotación forestal en la región de Chimanes, descubrimos que el madereo ilimitado es de dos a cinco veces más rentable que el madereo que asegure un suministro continuo de caoba. Así pues, desde una perspectiva puramente financiera, el enfoque más racional de la explotación forestal parece coincidir con el que siguen las compañías madereras: primero, recolectar todo el caobo disponible, prescindiendo de cualquier apuesta por recolecciones futuras; y luego, proseguir, de forma secuencial, con

RICHARD E. RICE, RAYMOND E. GULLISON y JOHN W. REID convergieron en el estudio de las dificultades que atraviesa el mantemiento de la pluviselva desde orígenes muy dispares. Rice se licenció en ciencias económicas y se doctoró en recursos naturales por la Universidad de Michigan. Hoy dirige el programa de economía de recursos de Conservation International, una empresa de Washington, D.C. Después de graduarse en zoología por la Universidad de Columbia Británica, Gullison ahondó en ecología y biología evolutiva en Princeton, donde terminó su doctorado en 1995. Ahora enseña en el Colegio Imperial de Ciencia, Tecnología y Medicina de Londres. Reid se licenció en política fiscal en la Universidad de Harvard antes de incorporarse en 1994 a Conservation International. Allí su trabajo se centra en la economía de los recursos naturales y en la vertiente política de la conservación de los trópicos.



3. LA IMAGEN DESDE SATELITE (*izquierda*) **de las selvas amazónicas** (*áreas rojas*) **muestra que la actividad maderera ha provocado una escasa agresión en el lado boliviano de la frontera. (En toda esta parte de Bolivia, incluido el parque nacional recientemente ampliado, ha habido explotación forestal.) Pero la amplia colonización y la agricultura de subsistencia cerca de las carreteras asfaltadas del lado brasileño han denudado la tierra de cubierta vegetal** (*áreas blancas*)**, como lo han hecho los desbroces efectuados para la ganadería vacuna a gran escala. Otras áreas no forestadas** (*azul*) **incluyen pantanos y, a mayor altitud, praderas naturales.**

otras especies que rinden un beneficio neto positivo. A lo que parece, la mano invisible de Adam Smith se extiende hasta lo más recóndito de la pluviselva.

Los incentivos por los que se mueve la explotación maderera incontrolada resultan ser muy poderosos en los países en vías de desarrollo, donde la normativa gubernamental acostumbra ser harto atractiva. Continuando con el ejemplo de Bolivia, la autoridad forestal nacional recibe anualmente menos de 40 pesetas por cada hectárea de tierra que administra. (En comparación, el Servicio Forestal de los Estados Unidos obtiene unas 6000 pesetas por una extensión semejante.) Ante una satisfacción tan magra, la administración boliviana sufre presiones muy fuertes para reequilibrar los beneficios financieros que resultan de la tala general de sus maderas nobles. No debe sorprendernos, pues, que sean muy pocas las compañías dedicadas a la explotación comercializable que consagren un mínimo esfuerzo en ayudar a la regeneración de las especies.

El valor de la viabilidad

Después de pasar algún tiempo en la región de Chimanes, decidimos investigar hasta qué punto la explotación maderera había perjudicado el entorno. No tardamos en descubrir que, aunque impiden la conservación del caobo, los efectos físicos de la tala sobre el bosque han sido en su conjunto bastante tolerables. En una parcela típica de 10 hectáreas sólo crecen uno o dos caobos; por tanto, la construcción de pistas, la tala y el acarreo de los troncos no llega a perturbar el 5 por ciento del territorio. De acuerdo con nuestros datos, el daño infligido por la tala resulta mucho menor que el causado por ciertas formas de gestión viable (que requieren una recolección más intensa de una mayor variedad de especies). La verdad es que la aplicación de una estrategia más acorde con los principios de la viabilidad podría incluso duplicar el perjuicio causado por el madereo.

De hecho, la viabilidad constituye un mal indicador del daño ambiental infligido por las operaciones de madereo. Las talas que llamamos inviables (incapaces de mantener indefinidamente la explotación de la especie deseada) no tienen por qué ser muy perjudiciales, aunque sí lo sean en algunos bosques, en particular cuando alojan varias especies de interés comercial. El madereo viable tampoco garantiza de suyo que el coste ambiental sea mínimo. En teoría, las compañías deberían gestionar los bosques de suerte tal que fuera, a la vez, viable para la madera y respetuoso con el medio. Por eso mismo, cuando los ecologistas se ven obligados a elegir entre el madereo inviable, de bajo impacto, y el madereo viable, de impacto elevado, tendrán que asegurarse de que escogen la opción que mejor concuerda con sus propósitos conservacionistas. Si el mantenimiento de la biodiversidad reviste máxima prioridad (idea que compartimos), entonces una estrategia de bajo impacto, aunque sea inviable, puede constituir la elección preferible.

No obstante, la consecución de una viabilidad indefinida de la explotación maderera ha pasado a ocupar un puesto central en el debate sobre la conservación de la pluviselva. En su empeño conservacionista, los comprometidos con dicho ideario han propuesto varias estrategias para superar los obstáculos económicos con que se enfrenta una gestión forestal viable. Pero no distinguen, por lo general, entre el beneficio de maderar los bosques existentes y el beneficio de apostar por su regeneración; en ausencia de un fuerte control gubernamental, ambos deben ser atractivos desde el punto de vista financiero, si queremos que tengan éxito.

Encontramos un ejemplo ilustrativo en el esfuerzo puesto en la promoción del empleo de especies arbóreas menos conocidas. Afirman ciertos defensores de la gestión viable que la creciente demanda de especies menos conocidas hará rentable mantener un bosque de producción que, sin ese destino, se convertiría en tierra arable o de pastos. Pero no hay nada (del tipo de un crecimiento más rápido o de una perspectiva de un precio mejor) que sugiera que las inversiones para regenerar dichas especies ofrecerán un atractivo mayor que las inversiones para regenerar las especies en explotación. La ampliación de mercados para las especies secundarias quizá no haga más que aumentar el número de árboles sometidos a sobreexplotación.

Puede esgrimirse un razonamiento similar con respecto a las transformaciones secundarias, o de valor añadido. Suele aducirse que dichas transformaciones (de los troncos en muebles o en madera contrachapada) tienen

Vive la différence

¿Por qué hay que proteger las selvas tropicales? Ante todo, porque albergan la mayor parte de la biodiversidad del planeta, término que engloba la variedad de ecosistemas, especies y genes presentes. Se supone que hay decenas de millones de especies vivas, aunque sólo se han descrito entre 1,4 y 1,5 millones de ellas. La mitad de las especies identificadas hasta la fecha viven en las selvas tropicales, pero los biólogos sospechan que esta proporción podría llegar al 90 por ciento si acaso pudiera realizarse un censo completo.

Algunos ejemplos ayudan a situar la abundancia biológica de las selvas tropicales en su perspectiva adecuada. En un estudio, se encontró que una hectárea de pluviselva en Perú contenía 300 especies de árboles... casi la mitad del número de especies nativas de Norteamérica. En otro ensayo, los científicos contaron más de 1300 especies de mariposas y 600 especies de aves que vivían en un retazo de pluviselva peruana de cinco kilómetros cuadrados. (En todos los Estados Unidos no pasan de 400 las especies de mariposas y de 700 las especies de aves.) En la misma jungla peruana, el entomólogo Edward O. Wilson, de Harvard, descubrió 43 especies de hormigas en un mismo árbol, lo que, según señaló Wilson, es aproximadamente el mismo número de especies de hormigas que existen en todas las islas Británicas.

Tal diversidad de vida vegetal y animal reviste sumo interés para el hombre, ya que es esencial para crear alimentos, medicinas y materias primas. Las plantas silvestres, por ejemplo, contienen los recursos genéticos necesarios para producir cosechas que resistan las plagas y las enfermedades. Y alrededor de 120 medicamentos específicos proceden de 95 especies de plantas, 39 de las cuales crecen en selvas tropicales. Y más importante aún: los botánicos creen que de 35.000 a 70.000 especies de plantas (la mayoría obtenidas de selvas tropicales) proporcionan remedios tradicionales en todo el mundo. Si se hacen desaparecer los lugares donde viven, miles de medicamentos se perderán para siempre.

Un instrumento para proteger la biodiversidad es el Convenio sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas (CITES), el tratado de 1973 que libró a elefantes y gorilas de la extinción. Bolivia, que ocupa el segundo lugar después de Brasil en exportaciones de caoba, acaba de solicitar a los Estados Unidos que se sumen a la postura boliviana en pro de incluir el caobo (*Swietenia macrophylla*) en el acuerdo CITES. Se pretende añadir el caobo a la lista reseñada en el Apéndice 2 del tratado, cuyas exportaciones los países firmantes han de supervisar para asegurar que el comercio internacional no amenace a las especies. (El Apéndice 1 del tratado CITES incluye las especies en peligro real y prohíbe su exportación comercial.)

A la solicitud boliviana en demanda de protección para la caoba se han agregado entidades norteamericanas.

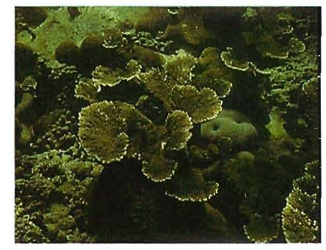
—*R. E. R, R. E. G.* y *J. W. R.*

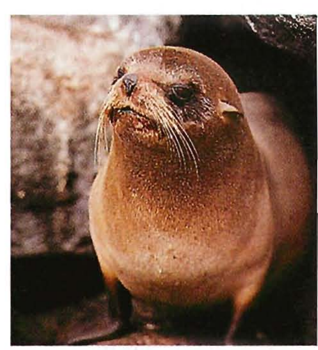














la ventaja doble de permitir el uso de una mayor variedad de especies y de proporcionar un incentivo económico más poderoso para gestionar los bosques de acuerdo con una estrategia de viabilidad. La verdad es que, en muchos países, la promoción de transformaciones de valor añadido ha reducido sus ganancias globales: se necesitan grandes subsidios para atraer las inversiones oportunas; además, la velocidad y la escala de la destrucción de los bosques aumentaban mucho.

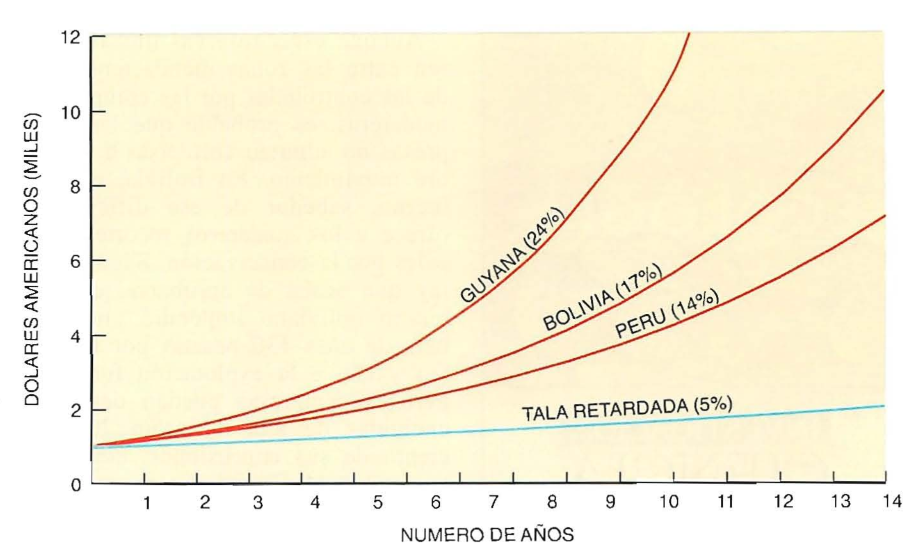
Los argumentos en pro de una concesión en firme de las tierras adolecen de una limitación similar. Los conservacionistas señalan la falta de acceso a largo plazo a los recursos forestales como una de las causas principales de la explotaciones que no se rigen por el criterio de la viabilidad. Hay una razón de sentido común: sin una concesión garantizada en firme, ninguna compañía se arriesgará a invertir en explotaciones futuras. Pero la mera seguridad de que las empresas puedan, en principio, obtener beneficios si promueven la regeneración de los bosques no comporta los incentivos financieros prácticos que fomenten tales prácticas. Cierto es que una concesión en firme facilita que las empresas se planteen la posibilidad de invertir en regeneración, pero no asegura, de manera automática, la rentabilidad económica de tales inversiones. En realidad, más que promover inversiones en regeneración, la concesión garantizada puede simplemente frenar las inversiones mayores en equipo maderero, lo que supondría una agostamiento más rápido del recurso.

Y ésa es la cuestión por la que Reid se incorporó a nuestro equipo en 1994. Rice había conocido a Reid dos años antes, en medio de una tormenta torrencial en el corazón de El Petén, la provincia septentrional, muy forestada, de Guatemala. Aunque suspendida allí, por decreto, la explotación maderera, el gobierno consideraba la posibilidad de ceder grandes extensiones de bosque a compañías

4. ALGUNAS ESPECIES inspeccionadas de entre los centenares que figuran en el Apéndice 2 del Convenio sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas; son (*izquierda, de arriba abajo*): orquídeas, ranitas de los dardos envenenados, camaleones, colibríes, corales hermatípicos, lobos marinos de las Galápagos y plantas americanas del ginseng.

bajo contratos con una duración de 25 años.

Una cesión tan prolongada a los madereros no resolvería los problemas de la explotación forestal inviable y de una frontera agrícola en expansión. En eso estábamos de acuerdo. Temíamos, además, que pudiera perjudicar a los miles de personas que vagan por estos bosques en busca de látex chicle (una goma), hojas de palma ornamentales y pimienta malagueta, todos ellos valiosos productos de exportación. Por eso, cuando las autoridades prepararon un anteproyecto para facilitar concesiones a largo plazo confiando en promover una gestión viable, Rice llamó a Reid para preguntarle si le gustaría examinar el articulado. Seis semanas después el gobierno guatemalteco tenía nuestro informe. Demostrábamos en él que las compañías tendrían que absorber un fuerte recorte de beneficios en la gestión de tales bosques con criterio de viabilidad. El proyecto se archivó, aunque continúan las presiones para ceder el bosque a la industria maderera.



5. LAS GANANCIAS FINANCIERAS que pueden obtenerse talando árboles valorados en unos 1000 dólares americanos e invirtiendo las ganancias a los intereses reales que se pueden obtener en los distintos países de la zona (*rojo*), sobrepasan los beneficios obtenidos si se deja que los árboles crezcan en tamaño y valor antes de talarlos (*azul*).

Certificado verde

Muchas personas preocupadas por el futuro de la pluviselva piensan que el certificado de origen de la madera, el "etiquetaje verde", allanará los obstáculos de los incentivos económicos necesarios para estimular la gestión viable. Dichos programas de certificación reclaman el acatamiento voluntario de normas ambientales establecidas a cambio de precios más altos, un mayor acceso a los mercados o ambas cosas a la vez. Mientras los expertos debaten si la certificación conduce o no a precios de mercado más altos, el quid de la cuestión está en saber si las bonificaciones que los consumidores se hallan dispuestos a pagar por productos certificados bastarán para producir los cambios necesarios. Nuestro análisis económico de las operaciones de Chimanes indicaba que, para las maderas nobles (caoba, por ejemplo), las pautas actuales de sobreexplotación resultan hasta cinco veces más rentables que una alternativa que respete el criterio de la viabilidad. Pero los consumidores parecen estar dispuestos a gastar, como máximo, el 10 por ciento más por madera certificada que el precio que pagarían por productos maderables sin ese marchamo. Una diferencia enorme.

No obstante, la certificación constituye un instrumento potencial de sumo interés para la conservación de los bosques, siempre que esa medida se concentre en modificaciones de bajo coste que reduzcan la agresión ambiental (evitar que los madereros cacen animales de la selva) y no en cambios costosos que produzcan dudosos beneficios. No existe todavía una amplia demanda de madera certificada por parte del consumidor; sí parece haber un nicho creciente que podría ocuparse en la hipótesis de que se reduzcan al mínimo los costes que conlleva el ser respetuoso con el medio. Mientras tanto, lo prudente sería evitar alterar los incentivos económicos que mueven las operaciones madereras —aumentar la seguridad de la concesión o promover especies menos conocidas—, al objeto de proteger al pequeño número implicado en la certificación. Mientras no se generalice la certificación, tales políticas no harían más que acelerar la degradación de las selvas tropicales.

¿Qué hacer?

Es improbable que se generalice la gestión de las selvas tropicales ajustada a una explotación maderera acorde con el criterio de viabilidad, al menos en un futuro inmediato. Laboran en contra los incentivos económicos opuestos, un control gubernamental limitado y la falta de apoyo político local, que arruinarán los mejores esfuerzos en esa dirección, sobre todo en los países en vías de desarrollo. Importa que los partidarios de la conservación tomen conciencia de esa realidad. Sin embargo, pese a no haber soluciones fáciles, ciertas estrategias merecen particular atención.

Por ejemplo, suministrar a las compañías madereras créditos a bajo interés para que financien la regeneración y la protección de la biodiversidad. Las explotaciones forestales que acometen también tales actividades no resultan rentables a las altas tasas de interés que se ofrecen en los países en vías de desarrollo, pero podrían serlo si se financian con capital más barato, aportado por bancos de desarrollo o inversores con sensibilidad por esas cuestiones.

Otra opción sería promover la conservación de extensas áreas forestales en el recinto de las concesiones madereras y en sus aledaños. La vigilancia de tales zonas protegidas contribuiría a la conservación de la biodiversidad sin gran dispendio económico. En vez de limitarse a la cobertura forestal, esas zonas exentas podrían abarcar bosques con su listado casi entero de especies y su estructura de ecosistemas maduros. Sería ideal que estas tierras fueran contiguas o próximas a otros bosques exentos. Para minimizar los costes, sugerimos reservar con ese fin zonas sin interés comercial: lugares demasiado empinados para ser talados o bosques que en el pasado apenas se hayan explotado.

Aunque estas reservas quizá figuren entre las zonas menos rentables de las controladas por las compañías madereras, es probable que las empresas no admitan cortapisas a su libre movimiento. En Bolivia, el gobierno, sabedor de esa dificultad, ofrece a los madereros recortes fiscales por la conservación. Según una ley que acaba de aprobarse, el gobierno boliviano impondrá una gabela de unas 130 pesetas por hectárea y año a la explotación forestal. Pero las empresas pueden designar excluidas de tala hasta un 30 por ciento de sus concesiones; esas zonas reservadas quedarán exentas de tributación. Con semejantes medidas es de esperar que los madereros protejan las tierras marginales (desde un punto de vista comercial) y se ablande su resistencia a detraer de la explotación forestal otras áreas para la protección del ambiente.

Por último, en Chimanes y bosques asimilados, donde apenas existen presiones para la colonización del territorio y se practica un madereo sin control, el aceptar algunos elementos de la situación actual puede llegar a ser la mejor de las opciones. A buen seguro, e igual que ocurre en muchas zonas de las tierras bajas bolivianas, la explotación forestal continuará en Chimanes después de que se haya agotado el caobo. La pauta actual de explotación selectiva de un gran número de especies comerciales, a razón de una o dos especies por tanda, es un proceso secuencial que en algunos sitios puede tardar años en cerrarse. Así las cosas, los conservacionistas no deben tanto pretender convencer a las compañías madereras para que se queden y talen de manera que sea viable a largo plazo, cuanto instituir alguna forma de protección para los bosques maduros mientras exista oportunidad.

Los conservacionistas han de recordar, asimismo, que las amenazas no terminan con la adopción general de una gestión de la pluviselva atenida al criterio de viabilidad. Las políticas agrícolas nacionales, la extensión de la red de carreteras y la colonización son procesos que plantean, cada uno de ellos, peligros mucho mayores para los bosques tropicales que el madereo sin control. Frenar la destrucción causada por esos factores puede hacer por la conservación de las selvas mucho más que remendar las prácticas forestales actuales.

No existe una estrategia común que valga para todos los bosques y en todo momento. Nuestras recomendaciones (en particular para las zonas maduras que se detraen de la explotación forestal) pueden carecer de eficacia ante las mismas fuerzas que ahora frustran la gestión viable de los bosques. Con el tiempo, los madereros tendrán un incentivo cada vez mayor para penetrar en las áreas que hoy no resultan rentables. Si no interviene con mano firme el gobierno, también estas alternativas fracasarán como sucumbieron los esfuerzos por imponer la explotación forestal viable. Pero nuestra propuesta de zonas exentas de madereo se distingue en el sentido de que aporta beneficios ambientales reales e inmediatos al proteger la selva madura. Además, se basa en la acotación directa de la zona de explotación y no en complejas normas técnicas sobre la forma de llevar a cabo la tala.

Aunque están lejos de proporcionar soluciones enteramente satisfactorias, las medidas que sugerimos pueden ser los instrumentos más realistas para armonizar la conservación con la extracción de maderas tropicales, hasta que el cambio político y económico en el mundo en vías de desarrollo conlleve una protección exigente y eficaz de las majestuosas selvas tropicales.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE ECONOMICS OF OVEREXPLOITATION. C. W. Clark en *Science*, volumen 181, n.º 4100, págs. 630-634; 17 de agosto, 1973.

THE TROPICAL TIMBER TRADE AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT. Jeffrey R. Vincent en *Science*, volumen 256, páginas 1651-1655; 19 de junio, 1992.

ECOLOGY AND MANAGEMENT OF MAHOGANY (*SWIETENIA MACROPHYLLA* KING) IN THE CHIMANES FOREST, BENI, BOLIVIA. R. E. Gullison, S. N. Panfil, J. J. Strouse y S. P. Hubbell en *Botanical Journal of the Linnean Society*, volumen 122, número 1, páginas 9-34; septiembre, 1996.

SIMULATED FINANCIAL RETURNS AND SELECTED ENVIRONMENTAL IMPACTS FROM FOUR ALTERNATIVE SILVICULTURAL PRESCRIPTIONS APPLIED IN THE NEOTROPICS: A CASE STUDY OF THE CHIMANES FOREST, BOLIVIA. A. F. Howard, R. E. Rice y R. E. Gullison en *Forest Ecology and Management*, volumen 89, números 1-3, páginas 43-57; 1 de diciembre, 1996.

Maxima QX.
Para los que prefieren viajar en avión.

TBWA

Modelo presentado MAXIMA QX 3.0 SE

Señores pasajeros: durante el trayecto disfrutarán, entre otras cosas, de motores de 6 cilindros en V, de 24 válvulas y control electrónico (ECCS, Suspensión Multibrazo con Sistema de Control Lineal MLB), ABS de cuatro canales, doble airbag, climatizador y llantas de aleación. Abróchense los cinturones y feliz vuelo. (Equipamiento según versiones).

Garantía total
3 años ó 100.000 km
y 6 años anticorrosión

LLAMA 902 253 253
INTERNET:HTTP://WWW.NISSAN.ES

Modelo	P.V.P.*
MAXIMA QX 2.0 SE	4.614.000
MAXIMA QX 2.0 SE Automático	4.714.000
MAXIMA QX 3.0 SE	6.046.000
MAXIMA QX 3.0 SE Automático	6.146.000

*P.V.P. Recomendado (IVA, Impuesto de Matriculación, Transporte, NISSAN Assistance incluidos) en Península y Baleares. Válido hasta fin de mes para vehículos en stock.



Los agujeros negros y la paradoja de la información

¿Qué ocurre con la información contenida en la materia destruida por los agujeros negros? En su búsqueda de una respuesta, los físicos andan a tientas hacia una teoría cuántica de la gravedad

Leonard Susskind

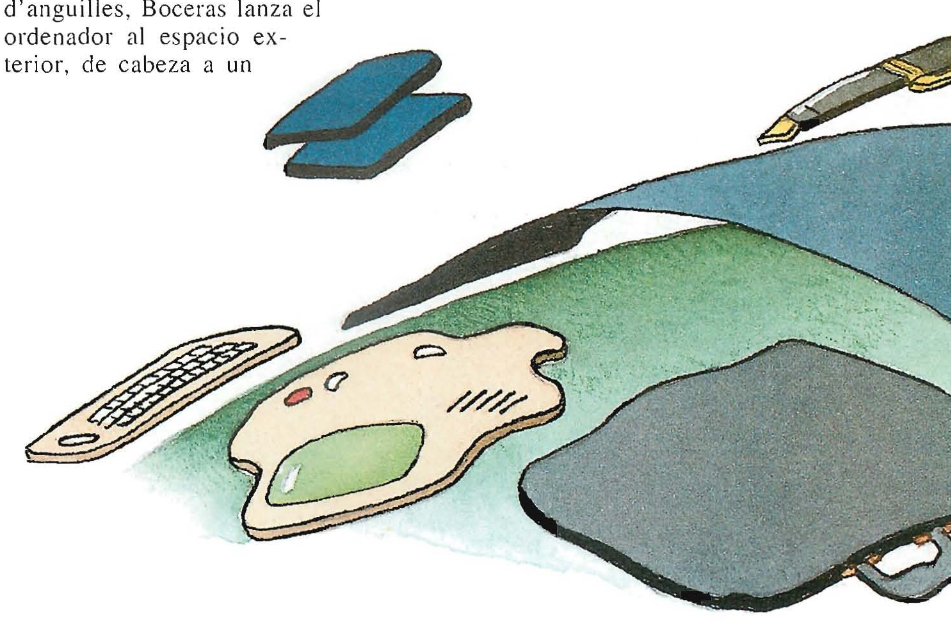
En un lugar del espacio sideral el profesor Potaje ha saboteado la cápsula de tiempo de su archirrival, el profesor Boceras. Va en ella la única copia que hay de una fórmula matemática de importancia vital, para que las generaciones futuras la empleen. Pero el diabólico plan que ha urdido Potaje de poner una bomba de hidrógeno en la cápsula triunfa. ¡Pum! La fórmula se desintegra en una nube de electrones, de nucleones, de fotones y de algún que otro neutrino. Boceras se queda en blanco. No tiene apuntada la fórmula y no recuerda cómo obtenerla.

En el juicio alega que el pecado de Potaje no tiene perdón: "Es irreversible lo que ha hecho este loco. ¡Vamos! El muy sinvergüenza ha destruido mi fórmula y tiene que pagar. ¡Que le quiten la plaza!"

"¡Pero qué memez!", dice con los nervios bien templados Potaje. "No se puede destruir la información. Nunca. Es culpa de tu indolencia, Boceras. Es verdad que he liado un poco las cosas, pero lo único que tienes que hacer es ponerte manos a la obra, encontrar cada partícula de las cenizas e invertir su movimiento. Las leyes de la naturaleza son simétricas con el tiempo; por tanto, si todo se invierte, tu estúpida fórmula se recompondrá. Queda así demostrado, sin sombra de duda, que de ninguna manera es posible que haya destruido tu preciosa información." Potaje gana el juicio.

La venganza de Boceras no es menos diabólica. Mientras Potaje está fuera de la ciudad, le roban el ordenador y todos los discos, hasta los que tienen sus recetas de cocina. Para que sea segurísimo que Potaje nunca más gozará de su famoso matelote d'anguilles, Boceras lanza el ordenador al espacio exterior, de cabeza a un agujero negro que había por los alrededores.

En el juicio contra Boceras, Potaje está fuera de sí. "Esta vez has ido demasiado lejos, Boceras. No hay forma de recuperar mis ficheros. Están dentro del agujero negro, y si voy allá para sacarlos no hay vuelta de hoja, me hará trizas. Has destruido de verdad la información, y las pagarás."



1. LA SUPERFICIE del agujero negro le parece a Boceras (en la nave espacial) una membrana esférica (denominada horizonte). Boceras ve que Potaje, que cae dentro del agujero negro, va cada vez más despacio y se aplana en el horizonte; según la teoría de cuerdas, le parecerá además que Potaje está extendido por el horizonte entero. Boceras, que representa al observador externo, ve, pues, que la información contenida en todo lo que cae dentro del agujero negro se detiene en la superficie. Pero Potaje se percibe a sí mismo cayendo a través del horizonte hacia el centro del agujero negro, donde será triturado.

Boceras salta del asiento. "¡Protesto, señoría! Todo el mundo sabe que los agujeros negros acaban por evaporarse. Espere lo suficiente, que el agujero radiará su masa entera y no quedarán sino los fotones y demás partículas que haya emitido. Es verdad que quizá hagan falta 10^{70} años, pero son los principios los que cuentan. No hay ninguna diferencia en realidad con la bomba. Todo lo que Potaje tiene que hacer es invertir el derrotero de las partículas y su ordenador regresará del agujero negro."

"¡No es así", grita Potaje. "Esto es diferente. Mi receta se perdió tras la frontera del agujero negro, su horizonte. Cuando algo lo cruza, no puede volver atrás sin superar la velocidad de la luz. Y Einstein nos enseñó que no hay nada capaz de hacerlo. No hay forma de que los productos de la evaporación, que proceden de fuera del horizonte, puedan contener mis recetas perdidas, ni siquiera de la manera más trastocada. Es culpable, señoría."

Su señoría está confuso. "Necesitamos el testimonio de los expertos. Profesor Hawking, ¿qué dice usted?"

Suben al estrado a Stephen W. Hawking, de la Universidad de Cambridge. "Potaje tiene razón. En muchísimas situaciones la información se trastoca y desde un punto de vista práctico se pierde. Si, por ejemplo, se echa al aire una baraja, desaparece el orden original de los naipes. Pero, en principio, si supiésemos con todo detalle cómo se arrojaron las cartas al aire podríamos reconstruir el orden original. Ese es el principio de microrreversibilidad, y se cumple siempre en las físicas clásica y cuántica. Sin embargo, en mi artículo de 1976 mostré que se viola en los agujeros negros. Como la información no puede escapar del horizonte una vez lo ha cruzado, los agujeros negros son una nueva y fundamental fuente de irreversibilidad en la naturaleza. Boceras ha destruido realmente la información."

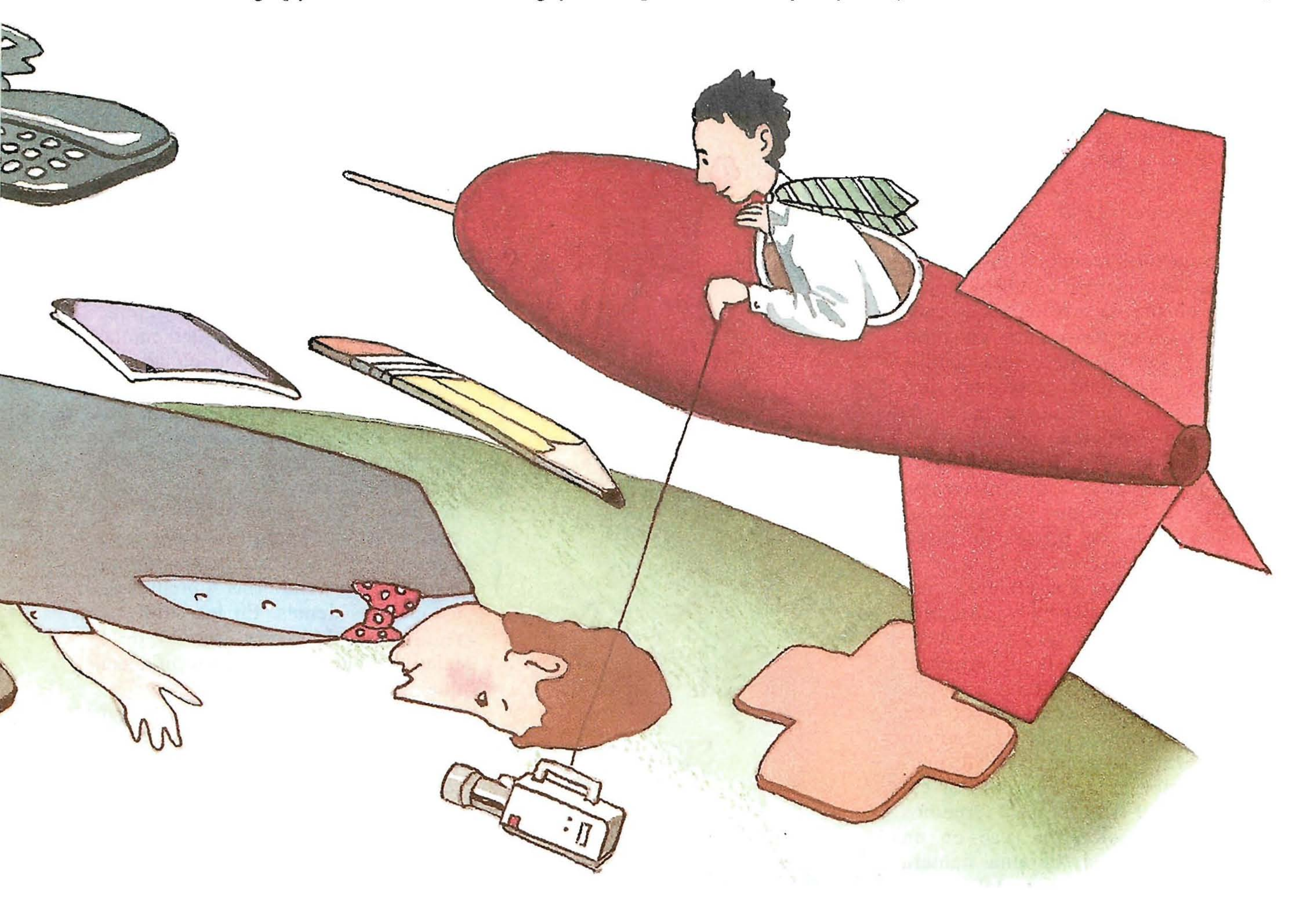
Su señoría interpela al acusado. "¿Qué tiene usted que alegar?" Boceras llama al profesor Gerard 't Hooft, de la Universidad de Utrecht.

"Hawking se equivoca", empieza 't Hooft su declaración. "Creo que los agujeros negros no tienen por qué conducir a una violación de las leyes aceptadas de la mecánica cuántica. Si fuese así, la teoría se nos iría de las manos. No se puede socavar la reversibilidad microscópica sin destruir la conservación de la energía. Si Hawking tuviese razón, el universo se calentaría en una ínfima fracción de segundo hasta los 10^{31} grados. Como no ha pasado tal cosa, es que tiene que haber una forma de sortear el problema."

Se llama a declarar a otros veinte famosos físicos teóricos. Lo único que queda claro es que son incapaces de ponerse de acuerdo.

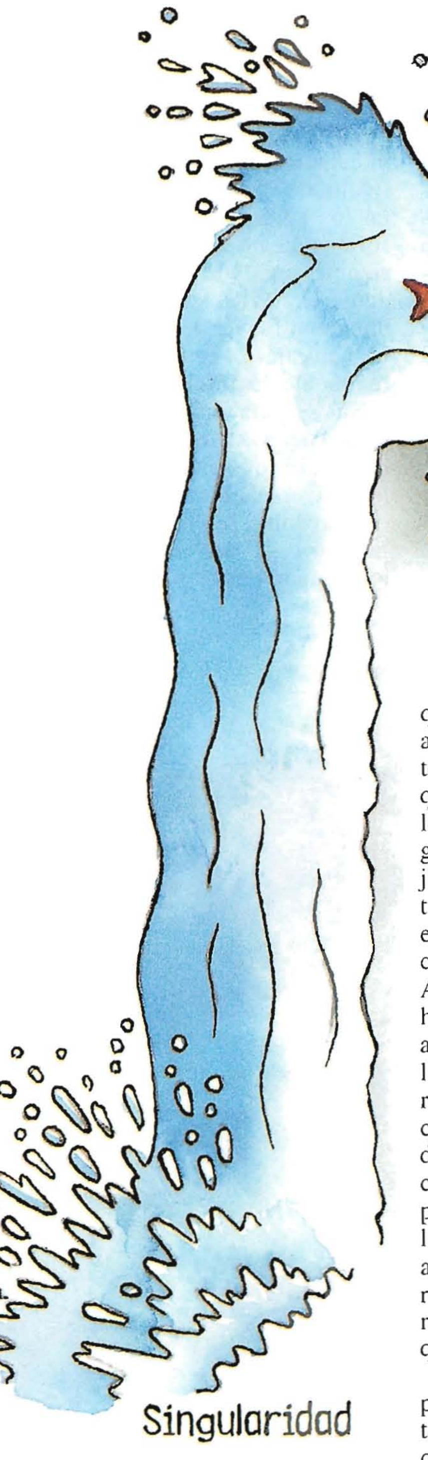
La paradoja de la información

Boceras y Potaje son, claro está, personajes ficticios. No lo son Hawking y 't Hooft, ni la controversia acerca de qué le pasa a la información que cae en un agujero negro. La idea de Hawking, que los agujeros negros consumen información, ha llamado la atención sobre una discrepancia, que puede ser muy grave, entre la mecánica cuántica y





2. EL HORIZONTE INVISIBLE se representa en esta analogía como una línea en un río. A su izquierda el agua corre más deprisa que la velocidad a la que un "luzio" puede nadar. Entonces, si un luzio es arrastrado más allá de esa línea, nunca podrá volver corriente arriba; estará condenado a destrozarse en la catarata. Pero en la línea el pez no advierte nada especial. Similarmente, un rayo de luz o una persona que estén dentro del horizonte no podrán retroceder; el objeto caerá sin remedio en la singularidad que hay en el centro del agujero negro, pero sin haber advertido nada especial en el horizonte.



la teoría general de la relatividad. El problema recibe el nombre de paradoja de la información.

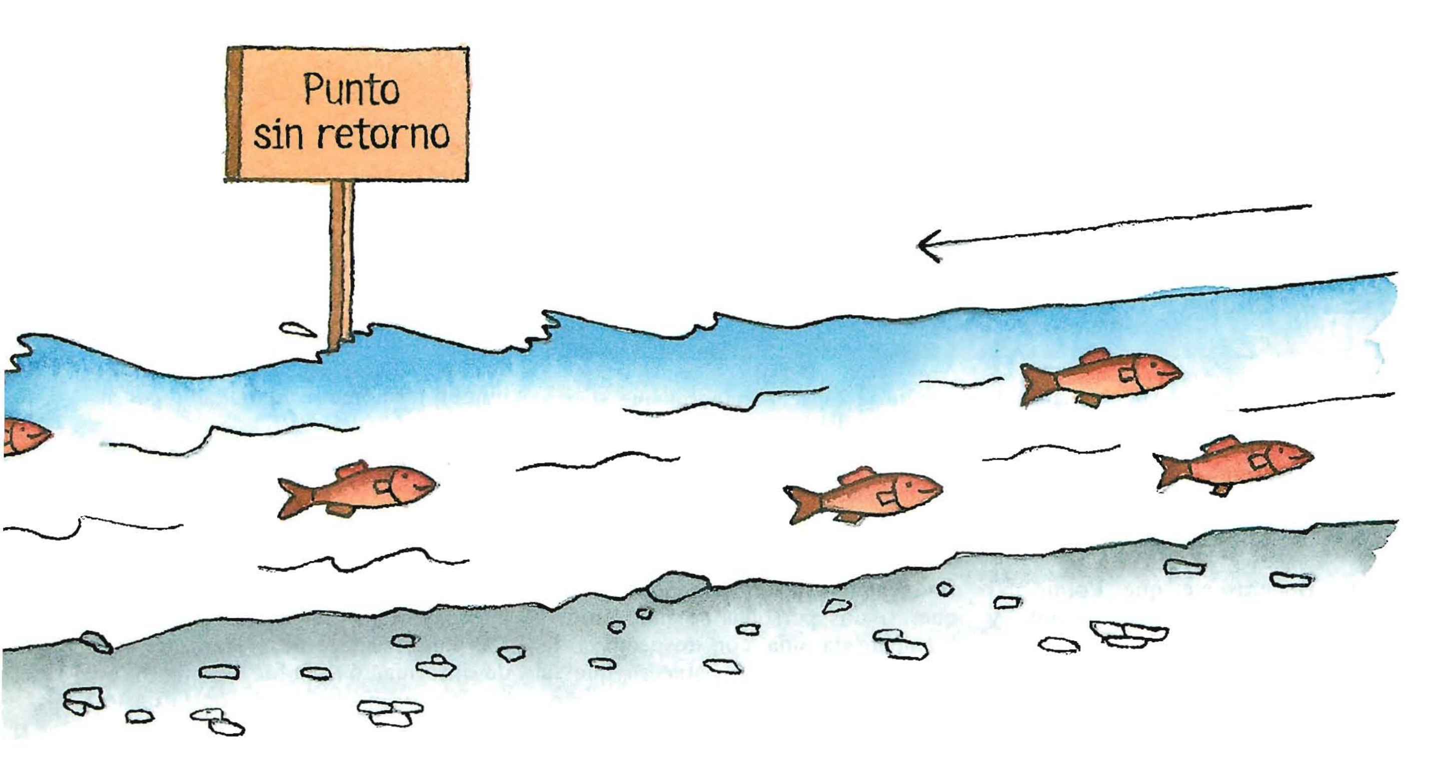
Cuando algo cae en un agujero negro no cabe esperar que vuelva afuera. Según Hawking, es imposible recuperar la información codificada en las propiedades de los átomos que constituyen el objeto perdido. En cierta ocasión, Albert Einstein expresó su rechazo de la mecánica cuántica con estas palabras: "Dios no juega a los dados." Pero Hawking dice que "Dios no sólo juega a los dados, sino que a veces los tira donde no se los puede ver": en un agujero negro.

El problema, señala 't Hooft, es que, si la información se pierde de verdad, la mecánica cuántica se viene abajo. Pese a su célebre indeterminación, la mecánica cuántica controla el comportamiento de las partículas, y lo hace de una manera muy concreta: reversiblemente. Cuando una partícula interacciona con otra, puede que sea absorbida o reflejada, y cabe incluso que se desintegre en otras partículas. Pero siempre será posible reconstruir las configuraciones originales de las partículas a partir de los productos finales.

Si los agujeros negros infringiesen esta regla, la energía podría crearse o destruirse, con lo que se vería amenazado uno de los pilares de la física. La estructura matemática de la mecánica cuántica garantiza la conservación de la energía y garantiza la reversibilidad; sin la una se pierde la otra. Como Thomas Banks, Michael Peskin y yo mostramos en 1980 en la Universidad de Stanford, la pérdida de información en un agujero negro lleva a la generación de cantidades inmensas de energía. Por estas razones 't Hooft y yo creemos que la información que cae en un agujero negro está, de una manera o de otra, a la disposición del mundo de fuera.

Hay físicos a los que les parece que la cuestión de qué pasa en un agujero negro es académica, y hasta teológica, como contar los ángeles que caben en la cabeza de un alfiler. Pero en absoluto es así: las reglas futuras de la física están en juego. Los procesos que ocurren dentro de un agujero negro no son sino ejemplos extremos de las interacciones entre partículas elementales. A las energías que pueden adquirir hoy las partículas en los mayores aceleradores (unos 10^{12} electronvolt), la atracción gravitatoria entre ellas resulta despreciable. Pero si una partícula tuviera una "energía de Planck" de unos 10^{28} electronvolt, se concentraría tanta energía —tanta masa, pues— en un volumen minúsculo que las fuerzas gravitatorias sobrepujarían a todas las demás. En las colisiones resultantes, la teoría general de la relatividad no tendría menos influencia que la mecánica cuántica.

Sobre el papel parece que la guía para la construcción de las futuras teorías de la física deberíamos buscarla en los aceleradores planckianos. Pero, ay, Shmuel Nussinov, de la Universidad de Tel Aviv, ha llegado a la conclusión de que tendrían que ser tan grandes como el universo conocido entero.



No obstante, las propiedades que ya nos son sabidas de la materia podrían revelarnos cómo es la física a las energías de Planck. Las partículas elementales tienen una serie de propiedades que nos hacen sospechar que, en definitivas cuentas, no son tan elementales: deben de tener en sí lo suyo de maquinaria aún por descubrir, y esos entresijos se regirían por la física en energías de Planck. Reconoceremos la correcta convergencia de la relatividad general y la física cuántica —o gravedad cuántica— por su capacidad de explicar las propiedades mensurables de los electrones, los fotones, los quarks y los neutrinos.

A ciencia cierta, sabemos muy poco de las colisiones allende la escala de Planck, pero hay atisbos fundados. A esas energías se concentra en las colisiones frontales tanta masa en un volumen tan reducido que se forma un agujero negro, con su evaporación consiguiente. Discernir si los agujeros negros violan o no las reglas de la mecánica cuántica, es esencial para desentrañar la estructura última de las partículas.

Nace un agujero negro cuando se juntan tanta masa o tanta energía en un volumen pequeño que las fuerzas gravitatorias dejan pequeñas a todas las otras y no hay nada que no se derrumbe bajo su propio peso. La materia se comprime hasta ocupar una región inimaginablemente pequeña, o singularidad, cuya densidad en su interior viene a ser infinita. Dejaremos aparte la singularidad.

La singularidad se halla rodeada por una superficie imaginaria, el horizonte. Para un agujero negro cuya masa sea igual a la de una galaxia, el horizonte está a 10^{11} kilómetros del centro (como los confines más remotos de nuestro sistema solar). Para un agujero negro de masa solar, el horizonte queda a sólo un kilómetro; y si la masa es sólo la de una montaña pequeña, a 10^{-13} centímetros, es decir, más o menos el tamaño de un protón.

El horizonte divide el espacio en dos regiones; podemos considerarlas el exterior y el interior del agujero negro. Suponga que Potaje, que está rastreando cerca del agujero negro a ver si encuentra su ordenador, dispara una partícula en dirección contraria al centro. Si él no está muy cerca, puede que la partícula, siempre que lleve una gran velocidad, supere la atracción gravitatoria del agujero negro y se aleje. Tendrá la mayor probabilidad de escapar si la velocidad es máxima, es decir, si es la de la luz. Pero si Potaje está demasiado cerca de la singularidad, la fuerza gravitatoria será tan potente, que hasta un rayo de luz será tragado. El horizonte es el lugar donde está el signo (virtual) que advierte: punto sin retorno. Ninguna partícula o señal del tipo que sea lo cruzarán de adentro afuera.

En el horizonte

Una analogía, inspirada por William G. Unruh, de la Universidad de la Columbia Británica, uno de los pioneros de la mecánica cuántica de los agujeros negros, sirve para explicar la importancia del horizonte. Imagínese un río que corriente abajo fuese cada vez más deprisa. Entre los peces que lo pueblan los más rápidos son los "luzios". Pero hay un punto donde el río corre a la velocidad máxima a la que pueden nadar. Está claro que ninguno que se deje arrastrar más allá podrá jamás retroceder; estará condenado a estrellarse en las rocas del fondo de las Cataratas de la Singularidad, que se hallan curso abajo. Sin embargo, para el luzio, que no sospecha nada, pasar por el punto sin retorno no es un suceso discernible. No hay corrientes u ondas de choque que le adviertan de que lo ha cruzado.

¿Qué le pasa a Potaje, que en un descuido se ha acercado demasiado al horizonte del agujero negro? Como el pez que se deja llevar por la corriente, no siente nada especial: ni fuerzas vigorosas, ni sacudidas violentas ni luces de aviso. Se toma el pulso con su reloj de pulsera: es normal; la respiración: normal. Para nuestro físico de ficción, el horizonte es como cualquier otro sitio.



3. LOS CONOS DE LUZ describen la trayectoria espacio-temporal que siguen los rayos luminosos emitidos desde un punto. Fuera del horizonte los conos apuntan hacia arriba, es decir, hacia delante en el tiempo. Pero, dentro del propio horizonte, el cono de luz se inclina, y la luz no puede sino caer en el centro del agujero negro.

Pero Boceras ve que Potaje, al que observa, fuera del horizonte y a seguro, desde una nave espacial, actúa de una manera peculiar. Para no perderlo de vista, ha tendido hasta el horizonte un cable con una cámara de vídeo y otros instrumentos de sondeo. La velocidad de Potaje, a medida que cae hacia el agujero negro, aumenta y se aproxima a la de la luz. Einstein halló que, si dos personas se mueven deprisa la una respecto a la otra, cada una verá que el reloj de la otra se retrasa; además, un reloj que esté cerca de un objeto de gran masa irá más despacio comparado con otro que esté en el espacio vacío. El Potaje que Boceras espía con su cámara es extrañamente letárgico: observa que mientras cae le enseña el puño cerrado, pero le parece que sus movimientos son cada vez más lentos hasta detenerse. Aunque Potaje cae horizonte adentro, Boceras nunca verá que llegue allí del todo.

En realidad, no sólo le parecerá que Potaje procede con lentitud creciente, sino también que su cuerpo se aplasta hasta convertirse en una fina capa: Einstein enseñó, además, que, si dos personas se mueven velozmente la una con respecto a la otra, a cada una le parecerá que la otra se aplana en su sentido de movimiento. Y Boceras debería ver algo aún más extraño: debería ver toda la materia que haya caído alguna vez en el agujero negro —el ordenador de Potaje incluido—, hasta la que originalmente lo creó, y observarla aplanada de esa misma forma y congelada en el horizonte. Con respecto al observador de fuera, toda esa materia sufre una demora temporal relativista. Para Boceras, el agujero negro consiste en un inmenso vertedero de materia aplanada situado en su horizonte. Pero Potaje no verá nada insólito hasta mucho más tarde, cuando llegue a la singularidad, donde fuerzas brutales lo machacarán.

Los teóricos de los agujeros negros han descubierto a lo largo de los años que sus propiedades pueden describirse desde fuera mediante una membrana matemática definida sobre el horizonte. Esta capa tiene muchas propiedades físicas, como la conductividad eléctrica y la viscosidad. La más sorprendente de sus propiedades quizá sea la que a principios de los años setenta propusieron Hawking, Unruh y Jacob D. Bekenstein, de la Universidad Hebrea de Israel. Hallaron que, como consecuencia de la mecánica cuántica, un agujero negro —en concreto su horizonte— se comporta como si contuviese calor. El horizonte es una capa de material caliente de algún tipo.

La temperatura del horizonte depende justo de donde se mida. Suponga que una de las sondas que Boceras ha conectado a su cable es un termómetro. Lejos del horizonte observa que la temperatura es inversamente proporcional a la masa del agujero negro. Si la masa del agujero negro es como la del Sol, esta "temperatura de Hawking" es de unos 10^{-8} grados, mucho más fría que el espacio intergaláctico. Pero a medida que el termómetro de Boceras se acerque al horizonte irá registrando temperaturas mayores. A un centímetro de distancia, marcará alrededor de una milésima de grado; a sólo un diámetro nuclear, 10.000 millones de grados. Al final, será tan grande que ningún termómetro imaginable podría medirla.

Los objetos calientes poseen, además, un desorden intrínseco, la entropía. Se halla ésta relacionada con la cantidad de información que puede portar un sistema. Piense en una red cristalina con N nodos. Cada uno puede albergar un átomo o ninguno. Por tanto, cada nodo lleva un "bit" de información, la de si hay o no un átomo en él; la red consta en total de N bits así y puede contener N unidades de información. Por cada nodo hay dos opciones y N maneras de combinarlas; en consecuencia, el sistema total puede estar en cualquiera de 2^N estados (cada uno de los cuales corresponde a un patrón de átomos distinto). La entropía (o desorden) se define como el logaritmo del número de estados posibles. Viene a ser igual a N, el mismo número que cuantifica la capacidad que el sistema tiene de portar información.

Bekenstein halló que la entropía de un agujero negro era proporcional al área de su horizonte. La fórmula precisa, desarrollada por Hawking, predice una entropía de $3{,}2 \times 10^{64}$ por centímetro cuadrado de área de horizonte. Sea cual sea el sistema físico que lleve en el horizonte los bits de información, tendrá que ser sumamente pequeño y estar densamente distribuido: sus dimensiones lineales habrán de medir sólo un $1/10^{20}$ del tamaño de un protón. Y deberá ser muy especial para que Potaje lo ignore por completo al atravesar el horizonte.

El descubrimiento de la entropía y demás propiedades térmicas de los agujeros negros condujo a Hawking a una conclusión muy interesante. Como los demás cuerpos calientes, un agujero negro tiene que radiar energía y partículas hacia el espacio circundante. La radiación procede de la región del horizonte y no viola la regla de que nada puede salir de sus dominios. Pero esa radiación hace que el agujero pierda energía y masa.

LEONARD SUSSKIND, uno de los creadores de la teoría de cuerdas, enseña en la Universidad de Stanford desde 1978. Se le deben importantes aportaciones a la física de las partículas elementales, la teoría cuántica de campos, la cosmología y, en los últimos tiempos, la teoría de los agujeros negros. Sus estudios actuales sobre la gravitación le han llevado a sugerir que la información podría comprimirse en una dimensión menor, y a esto él lo llama universo holográfico.

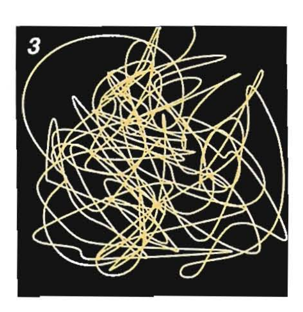
En el transcurso del tiempo un agujero negro aislado radiará toda su masa hasta extinguirse.

Todo esto, por peculiar que sea, lo conocen los relativistas desde hace años. La verdadera controversia nace cuando, siguiendo a Hawking, nos preguntamos por el destino de la información que cayó en el agujero negro durante su formación y después. En particular, ¿la devuelven afuera los productos de evaporación —si bien muy trastocada— o se pierde para siempre tras el horizonte?

Potaje, que siguió a su ordenador hasta el interior del agujero negro, insistiría en que su contenido traspasó el horizonte, donde se perdió para el mundo exterior; ése es, en muy pocas palabras, el argumento de Hawking. Boceras podría plantear el punto de vista contrario: "Vi que el ordenador caía hacia el horizonte, pero no llegué a ver que lo atravesase. La temperatura y la radiación adquirieron tal intensidad, que le perdí la pista. Creo que se desintegró; su energía y su masa retornaron luego en forma de radiación térmica. La coherencia de la mecánica cuántica exige que esa energía de evaporación lleve además consigo toda la información del ordenador." Esta es la posición que 't Hooft y yo adoptamos.







4. CASCADA DE VIBRACIONES de una cuerda. Se va haciendo más lenta y se vuelve visible si cae en un agujero negro. Las cuerdas son lo bastante pequeñas para codificar toda la información que jamás haya caído dentro del agujero negro y ofrecen una manera de sortear la paradoja de la información.

La complementariedad de los agujeros negros

¿Es posible que, en cierto sentido, tanto Potaje como Boceras tengan razón? ¿Es posible que las observaciones de Boceras sean, en efecto, coherentes con la hipótesis de que Potaje y su ordenador se han termalizado, para radiarse de nuevo hacia el espacio antes de llegar al horizonte, aun cuando Potaje no descubra nada insólito hasta mucho después, cuando se topa con la singularidad? La idea de que estos órdenes de cosas no son contradictorios, sino complementarios, fue adelantada, con el nombre de principio de complementariedad de los agujeros negros, por Lárus Thorlacius, por John Uglum y por mí mismo en Stanford. En la obra de 't Hooft se encuentran ideas muy parecidas. La complementariedad de los agujeros negros es un nuevo principio de relatividad. En virtud de la teoría especial de la relatividad, aunque los distintos observadores discrepen acerca de las longitudes de los intervalos de tiempo y espacio, los sucesos ocurren en localizaciones espacio-temporales definidas. La complementariedad de los agujeros negros prescinde hasta de eso.

La manera en que este principio entra de verdad en juego queda más clara si se aplica a la estructura de las partículas elementales. Suponga que Boceras, cuyo cable lleva además un poderoso microscopio, observa la caída de un átomo hacia el horizonte. Al principio lo ve como un núcleo rodeado por una nube de carga negativa. Los electrones de la nube se mueven tan deprisa, que forman una mancha borrosa. Pero a medida que se acerca al agujero negro parece que los movimientos internos del átomo se frenan y los electrones se vuelven visibles. Los protones y los neutrones del núcleo siguen moviéndose tan deprisa, que su estructura aún está oscura. Un poco después los electrones se congelan, y los protones y neutrones empiezan a dejarse ver. Pasa más tiempo y aparecen los quarks que constituyen esas partículas. (Potaje, que cae con el átomo, no percibe tales cambios.)

Muchos físicos creen que las partículas elementales están hechas de constituyentes aún menores. No hay todavía una teoría definitiva de esta maquinaria, pero una candidata, la más prometedora, destaca: la teoría de cuerdas. Según esta teoría una partícula elemental no se parece a un punto, sino a una diminuta goma elástica que puede vibrar de muchos modos. El modo fundamental es el de menor frecuencia; vienen luego los armónicos superiores, superpuestos unos sobre otros. Hay infinitos modos, cada uno de los cuales corresponde a una partícula elemental diferente.

Aquí vendrá bien otra comparación. No se pueden ver las alas de un colibrí cernido porque las bate demasiado deprisa. Pero si se toma una fotografía con una velocidad de obturación muy alta sí se ven, y el pájaro parece mayor. Si un colibrí cae en el agujero negro, Boceras irá viendo cómo sus alas toman forma a medida que el ave se acerca al horizonte y da la impresión de que la vibración se detiene; le parecerá que crece. Suponga ahora que las alas tienen unas plumas que se agitan más deprisa todavía. También ellas, pronto, serán visibles, y así crecerá aún más el tamaño aparente del pájaro. Boceras verá que el colibrí se agranda sin cesar. Pero Potaje, que cae con él, no ve tan extraño crecimiento.

Como las alas del colibrí, las oscilaciones de la cuerda suelen ser demasiado rápidas para que se las detecte. Una cuerda es un objeto pequeñísimo, $1/10^{20}$ veces el tamaño de un protón. Pero, a medida que va cayendo en el agujero negro, sus vibraciones se tornan más lentas y van dejándose ver con nitidez creciente. Los estudios matemáticos efectuados en Stanford por Amanda Peet, Thorlacius, Arthur Mezhlumian y el autor han desentrañado el comportamiento de la cuerda a medida que sus modos superiores se congelan. La cuerda se extiende y crece, lo mismo que si la estuviesen bombardeando las partículas y la radiación de un entorno muy caliente. En un intervalo temporal bastante breve, la cuerda y toda la información que lleve se extienden por el horizonte entero.

Este cuadro vale para toda materia que caiga en un agujero negro, ya que, según la teoría de cuerdas, todo está hecho, en última instancia, de cuerdas. Cada cuerda elemental se extiende y se superpone a las demás hasta que una densa maraña cubre el horizonte. Cada minúsculo segmento de cuerda, con sus 10^{-33} centímetros de diámetro, hace las veces de un bit. Las cuerdas, pues,

ofrecen un medio para que la superficie del agujero negro pueda contener la inmensa cantidad de información que cae en él durante y tras su nacimiento.

Teoría de cuerdas

Parece, pues, que el horizonte está hecho de toda la sustancia del agujero negro, resuelta en una gigantesca maraña de cuerdas. La información, por lo que se refiere a un observador exterior, no cayó en realidad nunca en el agujero negro; se detuvo en el horizonte y fue luego radiada afuera de nuevo. La teoría de cuerdas ofrece una realización concreta de la complementariedad de los agujeros negros y con ello una vía que sortea la paradoja de la información. Para los observadores exteriores —es decir, para nosotros—, la información no se pierde nunca. Y lo que reviste mayor interés, al parecer los bits del horizonte son segmentos diminutos de cuerda.

La descripción de la evolución de un agujero negro, desde el principio hasta el final, trasciende las posibilidades de las técnicas con las que cuentan los teóricos de cuerdas hoy en día. Pero algunos resultados, nuevos y apasionantes, van dándoles cuerpo matemático a estas ideas imaginativas. Los agujeros negros que mejor admiten una horma matemática son los "extremales". Los agujeros negros carentes de carga eléctrica se evaporan hasta que se radia toda su masa; los que sí la tienen, o tienen (teóricamente) carga magnética, no pueden, por el contrario, hacerlo: su evaporación cesa cuando la atracción gravitatoria se hace igual a la repulsión electrostática o magnetostática de lo que tengan dentro. Al objeto estable que queda se le llama agujero negro extremal.

Siguiendo unas sugerencias mías previas, Ashoke Sen, del Instituto Tata de Investigaciones Fundamentales, mostró en 1995 que, para ciertos agujeros negros extremales con carga eléctrica, el número de bits predicho por la teoría de cuerdas explica exactamente la entropía tal y como la mide el área del horizonte. Esta coincidencia fue el primer respaldo sólido que recibió la idea según la cual los agujeros negros son compatibles con las cuerdas mecanocuánticas.

Pero los agujeros negros de Sen eran microscópicos. Más recientemente, Andrew Strominger, de la Universidad de California en Santa Bárbara, Cumrun Vafa, de la de Harvard, y, un poco después, Curtis G. Callan y Juan Maldacena, de la Universidad de Princeton, generalizaron este análisis a los agujeros negros que tienen carga tanto eléctrica como magnética. A diferencia de los pequeñísimos agujeros de Sen, estos nuevos pueden ser lo bastante grandes para que Potaje caiga en ellos incólume. Los teóricos encontraron también una concordancia completa.

Debemos a dos grupos un nuevo cálculo, más apasionante aún, de la radiación de Hawking: Sumit R. Das, del Tata, con Samir Mathur, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, y Avinash Dhar, Gautam Mandal y Spenta R. Wadia, del Tata también, estudiaron el proceso por el que un agujero negro extremal que tenga cierto exceso de energía o de masa radia sus michelines. La teoría de cuerdas explicó completamente la radiación de Hawking que se producía. Parece que, lo mismo que la mecánica cuántica describe la radiación de un átomo indicando que un electrón salta de un estado "excitado" de energía superior a un estado "fundamental" de energía menor, las cuerdas cuánticas explican el espectro de la radiación a partir de un agujero negro excitado.

La mecánica cuántica, creo, resultará ser, con toda probabilidad, coherente con la teoría de la gravitación; estas dos grandes corrientes de la física se están fundiendo en una teoría cuántica de la gravedad basada en la teoría de cuerdas. La paradoja de la información, que por lo que se ve está muy en vías de resolverse, ha desempeñado un papel extraordinario en esta revolución en marcha de la física. Y aunque Potaje nunca lo admitiría, es probable que Boceras tenga razón al fin y al cabo: el mundo no ha perdido para siempre la receta del matelote d'anguilles.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

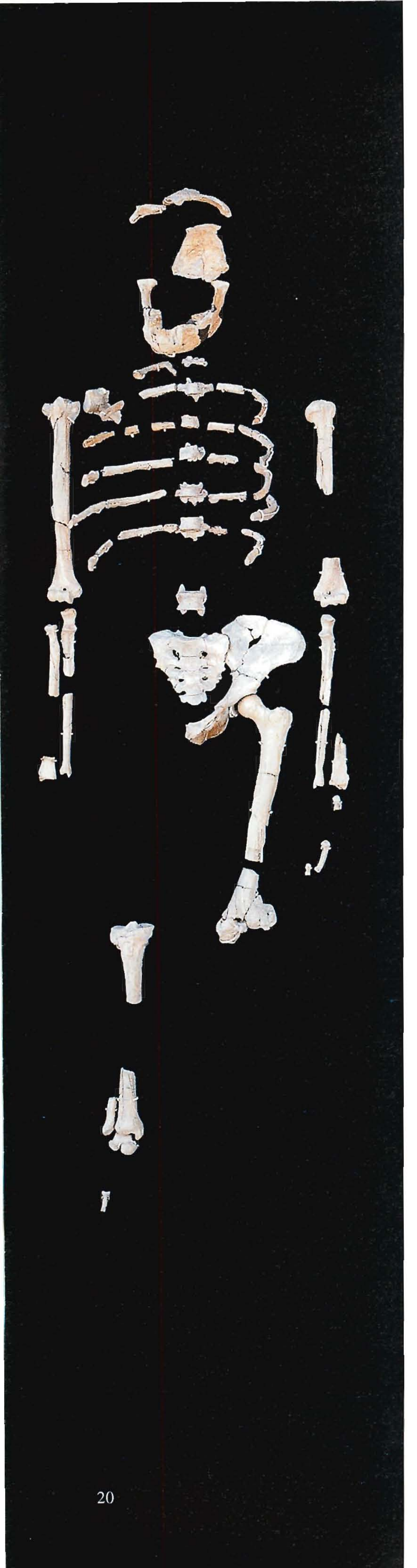
BLACK HOLES AND TIME WARPS: EINSTEIN'S OUTRAGEOUS LEGACY. Kip S. Thorne. W. W. Norton, 1994.

THE ILLUSTRATED A BRIEF HISTORY OF TIME. Stephen W. Hawking. Bantam Books, 1996.

EXPLICACIÓN DE TODO. Madhusree Mukerjee en *Investigación y Ciencia*, págs. 70-77, marzo de 1996.

Este es el dueño de la mayor fortuna del mundo. Su libertad.





De Africa ¿una... y otra vez?

Africa es el lugar de nacimiento de la humanidad. Pero, ¿cuántas especies humanas evolucionaron allí? ¿Cuándo emigraron?

Ian Tattersall

La secuencia parecía así de simple. La estirpe humana evolucionó en Africa. En una época bastante tardía, hubo humanos primitivos que terminaron por emigrar del continente donde se originaron, constituidos en *Homo erectus*, especie bien conocida y cuyos primeros representantes habrían llegado al Asia oriental hace alrededor de un millón de años. Todas las demás clases de humanos posteriores descenderían de esta especie; y había acuerdo casi unánime en clasificarlas dentro de nuestra propia especie, *Homo sapiens*. Reconociendo que algunos de estos descendientes diferían notablemente de nosotros, fueron denominados *H. sapiens* "arcaicos", sin que por ello dejara de considerárseles miembros de nuestra propia especie.

Interpretación de tan seductora simplicidad resultaba, sin embargo, demasiado hermosa para perdurar. En los últimos años se ha hecho evidente que las postreras etapas de la evolución humana fueron mucho más accidentadas de lo que convino en aceptarse durante largo tiempo. Pero eso también es aplicable para las primeras etapas, aunque todavía no hay razones para creer que el lugar de nacimiento de la humanidad estuviera fuera de Africa. Más aún, para bastante más de la primera mitad de la existencia documentada de la familia de los homínidos (que abarca todos los primates bípedos), no existe registro alguno en ningún otro continente. Ahora bien, las pruebas recabadas recientemente parecen indicar que no fue necesariamente *Homo erectus* quien emigró de Africa, a la vez que abonan la hipótesis de que estas peregrinaciones comenzaron antes de lo que habíamos pensado.

1. EL ESQUELETO DE "LUCY" representa a *Australopithecus afarensis*, la especie mejor conocida de homínido primitivo, o antepasado humano, a menudo caracterizada como "chimpancé bípedo". Este esqueleto de 3,18 millones de años de antigüedad procede de la región etíope de Hadar. Fotografía de D. Finnin y J. Beckett sobre molde en exhibición en el Museo Americano de Historia Natural.

Confusos inicios

Recientes descubrimientos en Kenya de fósiles atribuidos a la nueva especie *Australopithecus anamensis* han hecho retroceder la antigüedad del registro de los homínidos bípedos hasta un intervalo temporal comprendido entre hace 4,2 y 3,9 millones de años (m.a.). Los restos, más dudosos, desenterrados en Etiopía y asignados a *Ardipithecus ramidus*, pueden retrotraer dicha antigüedad hasta hace unos 4,4 m.a. Los fósiles de *A. anamensis* muestran un gran parecido con *Australopithecus afarensis*, especie posterior y mucho mejor conocida que apareció en yacimientos de Etiopía y Tanzania en el intervalo transcurrido entre hace 3,9 y 3 m.a., y cuyo más famoso representante es el esqueleto "Lucy" de Hadar, Etiopía.

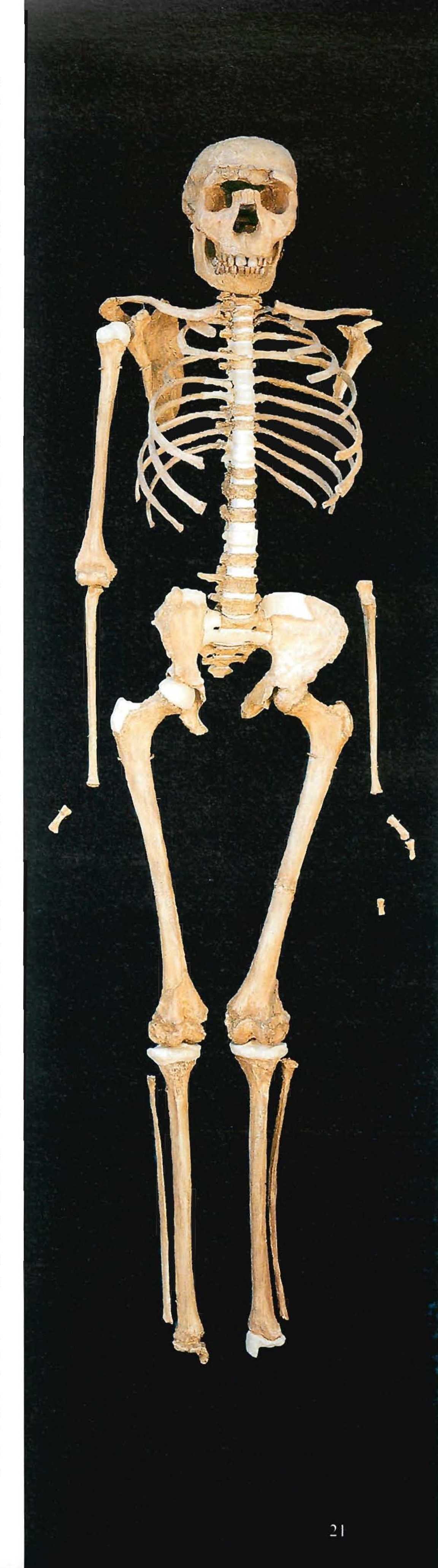
Lucy y su gente caminaban erguidos. Dan fe de ello, en particular, la estructura de sus pelvis y articulaciones de la rodilla. Conservaban, sin embargo, muchos rasgos ancestrales, sobre todo en manos, pies y en las proporciones de sus miembros, que los harían trepadores de árboles bastante hábiles. En estos rasgos, sumados a un cerebro del tamaño del que presentan los simios antropo-

morfos y a sus caras grandes y proyectadas, se han apoyado quienes ven en tales sujetos unos "chimpancés bípedos". Quizá sea ésta una caracterización bastante correcta, sobre todo si nos fijamos en las pruebas crecientes de que los primeros homínidos preferían parajes arbolados. Su modo de vida triunfó, evidentemente; aunque estos primates eran arborícolas menos hábiles que los simios actuales, y bípedos menos eficaces que los homínidos posteriores, el saber "nadar y guardar la ropa" les permitió resistir bastante más de dos millones de años, segmento temporal en el que especies de ese tipo aparecieron y desaparecieron del registro fósil.

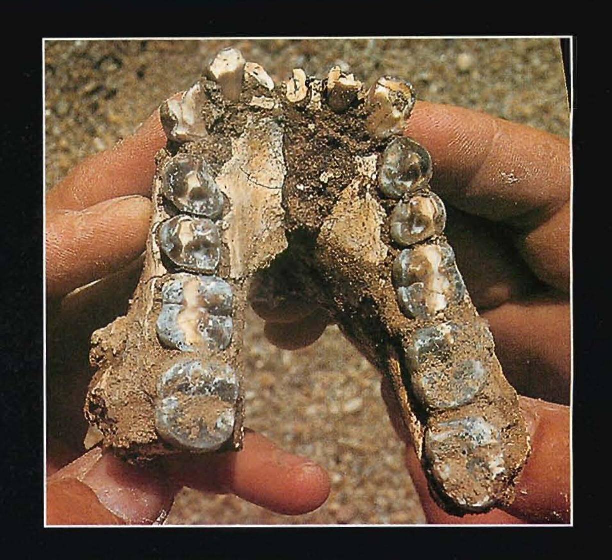
Ni siquiera está claro hasta qué punto cambiaron los estilos de vida con la invención de los útiles de piedra, hito que aconteció hace unos 2,5 millones de años y con el que se inaugura nuestro registro arqueológico. En los yacimientos de Kenya y Etiopía donde se han desenterrado los primeros instrumentos de piedra conocidos no hay fósiles humanos asociados. Sí contamos, en cambio, con una copiosa colección de homínidos fósiles de hace menos de 2 m.a., asociados, en su mayoría, a instrumentos líticos y huesos de mamífero descarnados; han aparecido en la Garganta tanzana de Olduvai y en la región kenyata del Turkana oriental. Cabe la posibilidad de que algunos, al menos, de los primeros fabricantes de instrumentos de piedra de esas zonas fueran, a duras penas, mayores o de esqueleto poco más avanzado que la grácil Lucy. Cabe, asimismo, que los primeros instrumentos fuesen preparados por homínidos con cerebro algo mayor, sujetos más altos y con estructuras corporales más modernas. En el campo de la evolución humana persisten abiertas todavía cuestiones fundamentales: cuántas especies de primeros homínidos hubo exactamente, cuáles de ellas fabricaron instrumentos y cómo caminaban.

Al menos en lo físico, la imagen adquiere mayor nitidez desde hace unos 1,9 m.a., cuando aparece en el norte de Kenya la primera prueba sólida de una especie que es claramente como nosotros. Estos humanos, ejemplificados por el "chico de Turkana" ("Turkana Boy"), un esqueleto de hace 1,6 m.a. conservado en un estado de integridad increíble y descubierto en 1984, poseían una estructura corporal esencialmente moderna, reveladora de un andar moderno. Combinaban dicha estructura con un cráneo de faz moderadamente grande, y cuyo cerebro encerrado doblaba, en tamaño, el de los simios (aunque no estaba muy por encima de la mitad del promedio humano moderno). El "chico de Turkana" habría muerto adolescente. De haber llegado a la madurez, se calcula que habría alcanzado, así se calcula, una estatura de 185 cm. Sus extremidades, largas y delgadas, se parecían a las de la gente que vive hoy en climas africanos cálidos y áridos, aunque, por supuesto, semejante adaptación común no indica ningún parentesco especial. Por fin, tenemos aquí homínidos que, en la sabana abierta, se hallaban en su casa.

De acuerdo con una vieja tradición en paleoantropología, hay que reducir al mínimo posible el número de especies que afloran en el registro fósil humano; el experto debe esforzarse, siguiendo esa tendencia, por trazar un modelo de evolución lineal y progresivo entre la exigua cifra de especies que se acepten. En justa coherencia con esa normativa, el "chico de Turkana" y fósiles afines se incluyeron, al comienzo, en la especie *H. erectus*. Descrita a partir de una bóveda craneana y un fémur encontrados en Java hace un siglo, muy pronto se incorporaron a esa especie fósiles hallados posteriormente en China (de manera particular los hoy desaparecidos del "Hombre de Pekín", con una antigüedad de 500.000 años) y en otros lugares de Java. De ese modo, *H. erectus* cobijó una amplia amalgama de homínidos fósiles, incluida una gran calvaria de la Garganta de Olduvai, identificada con las siglas OH9. Esta se ha redatado en unos 1,4 m.a.; en un principio se la supuso mucho más reciente. Todas las formas fósiles mencionadas poseían cerebros de tamaño moderado (entre unos 900 y 1200 mililitros de volumen, mientras que el valor promedio en humanos modernos es de alrededor de 1400 ml y en torno a 400 ml el de los simios), alojados en bóvedas craneanas alargadas y bajas, muy anguladas posteriormente y con fuertes rebordes supraorbitales anteriormente. Los pocos huesos de



2. EL "CHICO DE TURKANA", un adolescente de *Homo ergaster* datado en hace unos 1,6 millones de años, representa a los primeros homínidos con un esqueleto del cuerpo auténticamente moderno. Fotografía de D. Finnin y J. Beckett sobre molde en exhibición en el Museo Americano de Historia Natural.



3. LA ESPECIE *AUSTRALOPITHECUS ANAMENSIS*, un descubrimiento reciente, constituye el homínido más antiguo del que se tenga sólida documentación. A esta mandíbula de Kanapoi, Kenya, vista tal y como fue encontrada en el campo, se le atribuye una edad de unos cuatro millones de años. *A. anamensis* se parece mucho a *A. afarensis* en detalles de los dientes; un fragmento de tibia indica que caminaba de pie. Fotografía de Robert Campbell; cortesía de Meave Leakey.

las extremidades conocidos eran robustos, aunque en esencia como los nuestros.

La cuestión de si *H. erectus* llegó a vivir en Europa ha sido objeto de enconada controversia. Frente a tal posibilidad, se oponía una hipótesis alternativa: todos los primeros fósiles humanos de esa región (el más antiguo de ellos no tendría más de unos 500.000 años) serían *H. sapiens* "arcaicos". Puesto que los fósiles javaneses se habían fechado, convencionalmente, en el rango de 1 a 0,7 millones de años o menos, y habida cuenta de que a los primeros fósiles chinos no se les concedía una antigüedad superior al millón de años, la conclusión parecía clara: *H. erectus* (representado por OH9, el "chico de Turkana", más antiguo, y fósiles asociados) habría evolucionado en Africa y habría salido del continente en una fecha no muy superior al millón de años, para propagarse rápidamente hasta el Asia oriental, y dar origen a todos los procesos evolutivos posteriores, incluidos los europeos.

Sin embargo, vistos más de cerca, los especímenes de Kenya resultaron diferir con claridad, en lo que a la arquitectura del neurocráneo se refiere, de los *H. erectus* clásicos del este de Asia. En particular, ciertos rasgos anatómicos que alcanzan la categoría de especializados en el *H. erectus* del Asia oriental aparecen como primitivos en fósiles africanos de edad equiparable. Muchos investigadores empezaron a darse cuenta de que se trataba de dos clases de humanos primitivos. La forma kenyata, más antigua, se la tiende ahora a reubicar con mayor insistencia en una especie diferente, *H. ergaster*. Esta especie representa un antepasado verosímil de todos los humanos posteriores. Por contra, las especializaciones craneales de *H. erectus* sugieren que éste, considerado largo tiempo el homínido estándar para el período comprendido entre hace uno y hace medio millón de años, constituyó en realidad una evolución local (y como explicaré más abajo, terminal) del oriente asiático.

Un callejón sin salida en el este de Asia

Las cosas se complicaron a comienzos de 1994. El grupo encabezado por Carl C. Swisher, del Centro de Geocronología de Berkeley, aplicaron entonces un nuevo método de datación por argón/argón a muestras de rocas volcánicas tomadas de dos yacimientos con homínidos de Java. Los resultados fueron 1,81 y 1,66 m.a. Nadie esperaba tal antigüedad, aunque la cota superior confirmaba otra datación realizada muchos años antes. Para nuestro infortunio, los fósiles de ese par de yacimientos no sirven para emitir juicios discriminantes de especie: el primero es una calvaria de un niño (los individuos juveniles nunca muestran todas las características adultas a partir de las cuales se definen las especies) y el segundo es una cráneo terriblemente aplastado y deformado que nunca se ha logrado reconstruir a plena satisfacción. Ambos especímenes han sido considerados *H. erec-*





4. "HOMBRE DE PEKIN" es el nombre que recibió este cráneo masculino de *H. erectus* de Zhoukoudian, cerca de Pekín. El cráneo se reconstruyó a partir de fragmentos de varios individuos, todos de alrededor de 500.000 años de antigüedad, probablemente. Fotografía de Craig Chesek sobre un molde del Museo Americano de Historia Natural.



5. REPLICA DE UN NUCLEO de basalto olduvayense que ilustra cómo se extraían lascas del núcleo para obtener instrumentos cortantes. Este tipo de útiles se empezaron a fabricar hace unos 2,5 millones de años. Fotografía de Willard Whitson.





6. ESTOS DOS INSTRUMENTOS achelenses, de St. Acheul, Francia, datan probablemente de hace unos 300.000 años. Hubo útiles de esta clase en Africa hace 1,5 millones de años. El de la izquierda es un bifaz en punta y el de la derecha un hendedor de extremo recto. Fotografías de Willard Whitson.

tus por la mayoría de los autores, si bien más por conveniencia que por una razón poderosa. El debate sobre si el registro javanés contiene una o más especies de homínidos antiguos ha aflorado esporádicamente a lo largo de varias décadas. Añádase a ello la duda, planteada recientemente, de que las muestras que proporcionaron la edad más antigua procedieran del mismo lugar que el individuo infantil. Con todo, las fechas aducidas por Swisher encajan con otros datos que respaldan la probabilidad de que, en Asia oriental, hubiera habido homínidos de algún tipo mucho antes de lo imaginado.

Encontramos una confirmación independiente de este planteamiento en el yacimiento de Dmanisi, en la antigua república soviética de Georgia. Allí se halló, en 1991, una mandíbula de homínido que sus descubridores asignaron a *H. erectus*. Tres métodos diferentes de datación convergen en sugerir, para esa mandíbula, una antigüedad de 1,8 m.a. Aunque no todos los expertos están conformes con esa edad, de las dataciones de Georgia y las nuevas de Java, tomadas en conjunto, se infiere que hubo un éxodo de Africa, inesperadamente precoz, de los primeros homínidos. Por su parte, la lectura más obvia del registro fósil, aunque imperfecto, sugiere que esos primeros emigrantes pudieron pertenecer a la especie *H. ergaster*, u otra muy similar.

Una salida muy temprana de los homínidos de Africa ofrece la ventaja de explicar una aparente paradoja del registro arqueológico. Los útiles de piedra desenterrados en sedimentos contemporáneos de los primeros *H. ergaster* (rozando los 2 m.a.) son idénticos a los hechos por los que comienzan a fabricarlos muchos cientos de miles de años antes. Son instrumentos toscos, principalmente lascas cortantes extraídas con un percutor o "martillo" de piedra a partir de pequeños cantos. Pese a su eficacia cortadora (los arqueólogos han demostrado que con ellos pueden descuartizarse elefantes), no se tallaron de acuerdo con un patrón; simplemente se buscaba obtener un borde afilado y cortante.

Sin embargo, desde hace unos 1,4 m.a., se empezaron a producir útiles de piedra "normalizados", de los que son arquetipos las hachas de mano o bifaces y los hendedores de la industria achelense (identificada a mediados del siglo XIX en Saint Acheul, Francia). Estos instrumentos eran mayores, estaban cuidadosamente configurados por ambas caras y presentan forma de lágrima.

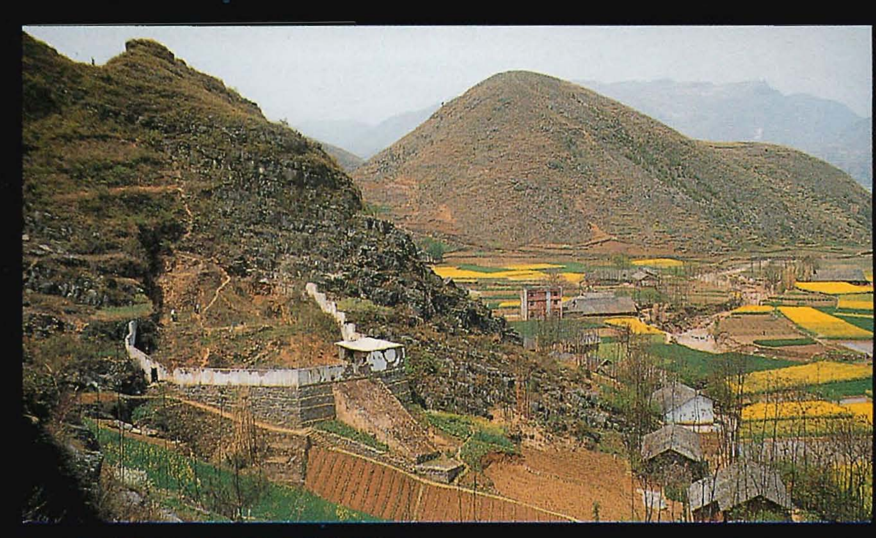
Para sorpresa de los paleontólogos, las industrias líticas del este de Asia carecen de tales utensilios. ¿Por qué, se preguntaron muchos, no habían llevado esta técnica consigo los primeros inmigrantes de la región, si sus antepasados ya la poseían desde hacía medio millón de años? La verdad es que las nuevas dataciones sugieren, sin embargo, que los primeros emigrantes habían dejado Africa antes de la invención de la tecnología achelense. En ese caso, pues, no hay razón para esperar encontrarla en el este de





7. BOVEDA CRANEANA conocida como Homínido 9 de Olduvai (OH9). Fechada ahora en 1,4 millones de años de antigüedad, creyóse en un comienzo que era mucho más reciente. Sus afinidades se debaten aún. Dibujos por Don McGranaghan.





8. LOS FOSILES DE LONGGUPO, como el fragmento mandibular (*vistas lateral y superior de la izquierda*), junto con toscos útiles de piedra (*derecha*), pueden indicar la presencia de homínidos en China hace 1,9 millones de años. Cortesía de Russell Ciochon, Universidad de Iowa.

Asia. Por cierto, hace unos años el arqueólogo Robin W. Dennell causó un buen revuelo al informar de la presencia de útiles de piedra muy toscos en Riwat, Pakistán, con más de 1,6 m.a., antigüedad que ahora parece cada vez menos anómala.

Cada descubrimiento abre nuevos interrogantes. Aquí la cuestión que se plantea es la siguiente: qué fue lo que facultó a las poblaciones humanas el poder expandirse fuera de Africa por primera vez. Muchos expertos han intuido que fueron los avances técnicos los que permitieron la ocupación de zonas continentales septentrionales más frías. Pero si los primeros emigrantes abandonaron Africa equipados sólo con la más tosca de las tecnologías líticas, forzoso es buscar más allá de la destreza técnica para encontrar la clave. Y dado que parece que la primera diáspora siguió inmediatamente a la adquisición de un cuerpo de tipo más o menos moderno, lo razonable será concluir que la pasión típicamente humana por los viajes surgió en conexión con la emancipación de los homínidos de los lindes selváticos que habían constituido su medio preferido.

Por supuesto, el hecho de que el "chico de Turkana" y su gente estuvieran adaptados en sus proporciones corporales a ambientes cálidos y secos no contribuye a explicar por qué *H. ergaster* fue capaz de propagarse rápidamente hacia las zonas templadas más frías al otro lado del Mediterráneo. Evidentemente, la nueva forma corporal que hizo po-





10. LA CUEVA de la Gran Dolina en la Sierra burgalesa de Atapuerca ha proporcionado los fósiles humanos más antiguos encontrados hasta ahora en Europa. Estos restos, datados en hace unos 780.000 años e inicialmente atribuidos a *H. heidelbergensis*, podrían pertenecer a otra especie. El hueso frontal juvenil y el fragmento mandibular (*derecha*) corresponden a uno de los fósiles de la Gran Dolina. El cráneo adulto (*centro*) procede de la Sima de los Huesos, aproximadamente a un kilómetro de la Gran Dolina, donde se han encontrado una gran cantidad de fósiles humanos, en general fragmentarios pero muy bien conservados, datados en unos 300.000 años de antigüedad. Fotografía de Javier Trueba; cortesía de Juan Luis Arsuaga.

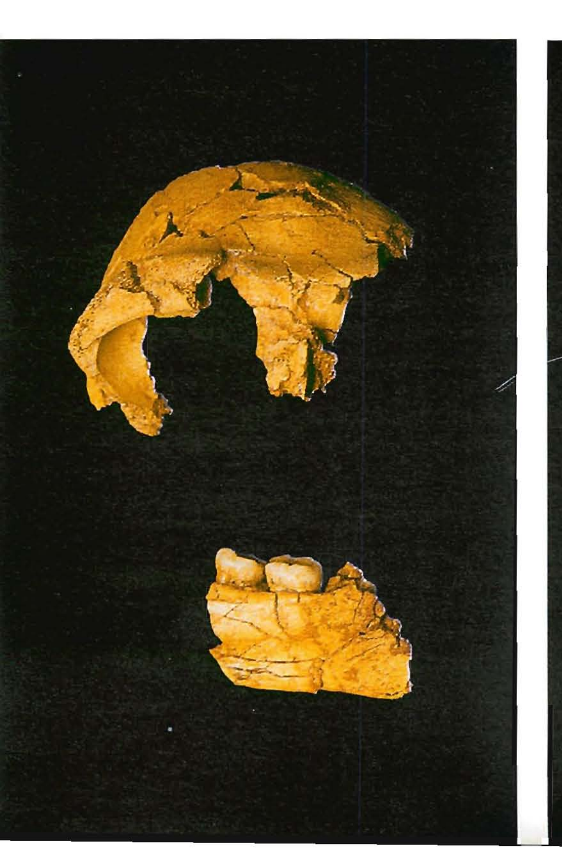




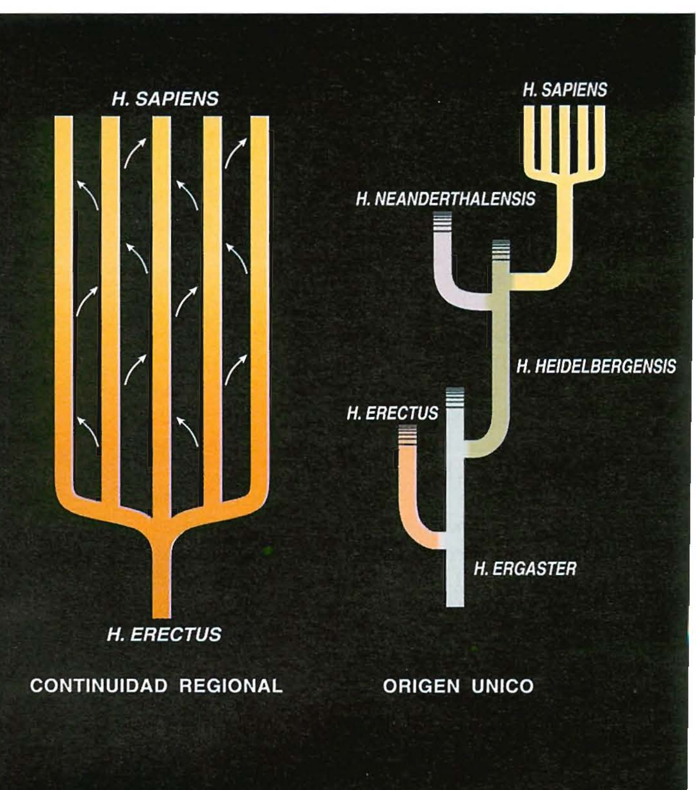
9. EL FRAGMENTO mandibular (*vistas superior y lateral*) de Dmanisi, en la antigua república soviética de Georgia, puede tener una antigüedad de 1,8 millones de años. Atribuido en un principio a *H. erectus*, se ignora a qué especie pertenece.

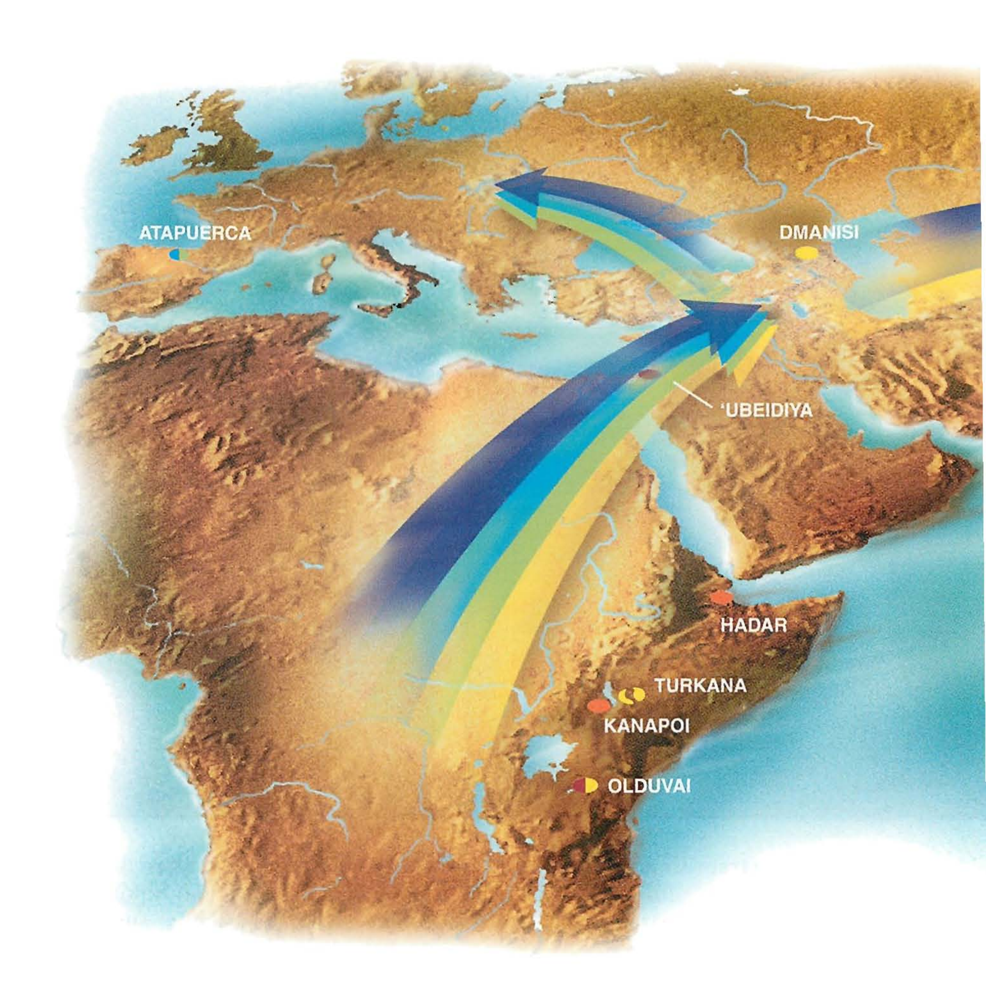
sible la extraordinaria supervivencia en entornos abiertos era en sí misma suficiente para marcar la diferencia.

La incapacidad del achelense para extenderse hacia el este de Asia refuerza la idea, compatible con las especializaciones craneales de *H. erectus*, de que esta parte del mundo fue una suerte de vía muerta paleoantropológica. En dicha región, las poblaciones humanas arcaicas siguieron en gran medida su propio camino, al margen de lo que ocurría en otras zonas del globo. Nuevas dataciones parecen confirmar tal hipótesis. En este sentido, Swisher y sus colegas acaban de fechar los *H. erectus* del yacimiento de Ngandong en Java en torno a sólo unos 40.000 años. Semejantes dataciones, pese a su escrupulosa fundamentación, se han recibido con notable escepticismo. Ahora bien, si son acertadas, comportarán importantes consecuencias para el modelo general de la evolución humana. Su proximidad induce a pensar en la existencia de una longeva especie *H. erectus* que podría haber sufrido un destino similar al experimentado en Europa por los neandertales: la extinción a manos de los *H. sapiens* llegados en época reciente. Se refuerza así la imagen de la evolución humana como una repetición de experimentos, con especies regionalmente diferenciadas, en este caso en lados opuestos del continente euroasiático, que terminaron reemplazadas por otras estirpes humanas cuya evolución había acontecido en un lugar distinto.



11. ESTOS DIAGRAMAS comparan las dos teorías más aceptadas sobre los orígenes de los humanos modernos. Según el modelo de la "continuidad regional", todas las poblaciones humanas modernas se remontan hasta *H. erectus*, pero cada población regional evolucionó siguiendo su propia línea, intercambiando suficientes genes con sus vecinos (*las flechas representan intercambio génico*) como para mantenerse dentro de la misma especie; todas ellas se convirtieron en *H. sapiens*. La teoría del "origen único" sostiene que *H. sapiens* desciende de una misma población ancestral que apareció en un solo lugar, probablemente Africa.





12. OLEADAS SUCESIVAS de humanos primitivos salieron de Africa hacia todas las partes del Viejo Mundo. El registro de las emigraciones es incompleto, pero resulta evidente que esta historia es mucho más larga y compleja de lo que se ha venido creyendo.

Un grupo internacional dirigido por Huang Wanpo de la Academia Sínica de Pekín anunció en 1996 una datación muy antigua para la cueva de Longgupo, en la provincia china de Sichuan. Este yacimiento había proporcionado ya un incisivo y un pequeño fragmento de mandíbula con dos dientes que, en un principio, se atribuyeron a *H. erectus*, además de artefactos líticos muy poco trabajados. Huang y sus colegas concluyeron que los fósiles e instrumentos podían tener 1,9 m.a. de antigüedad. Su reanálisis de los fósiles sugería una semejanza de éstos con los primeros fósiles africanos de *Homo* mayor que con *H. erectus*.

Esta última afirmación no ha quedado sin contestación. Como mi colega Jeffrey H. Schwartz, de la Universidad de Pittsburgh, y yo mismo hemos señalado, los dientes del fragmento mandibular recuerdan a *Homo* en rasgos primitivos más que en los especializados y propios de una relación de parentesco. Por si fuera poco, muestran una llamativa semejanza con los dientes de un hominoideo de tipo orangután conocido en un yacimiento muy posterior en Vietnam. Y aunque el incisivo parece de homínido, es bastante inespecífico; nada hay en él que permita alinearlo con ninguna especie humana en particular. Habrá que esperar futuros hallazgos fósiles en Longgupo para que se haga la luz sobre la situación; mientras tanto, el incisivo y los instrumentos líticos constituyen pruebas claras de la presencia humana en China en lo que parece ser una muy temprana fecha. Esos antiguos asiáticos orientales descendían de los primeros emigrantes desde Africa, y, sean lo que sean los homínidos de Longgupo, parece verosímil que Huang y sus colegas estén en lo cierto cuando sospechan que representan más un precursor de *H. erectus* que la especie propiamente dicha.

Aunque el cuadro descrito tiene sentido, persiste aún un cabo suelto. Si *H. erectus* representa una evolución local en el este de Asia, habrá entonces que preguntarse si hemos acertado al incluir la calvaria OH9

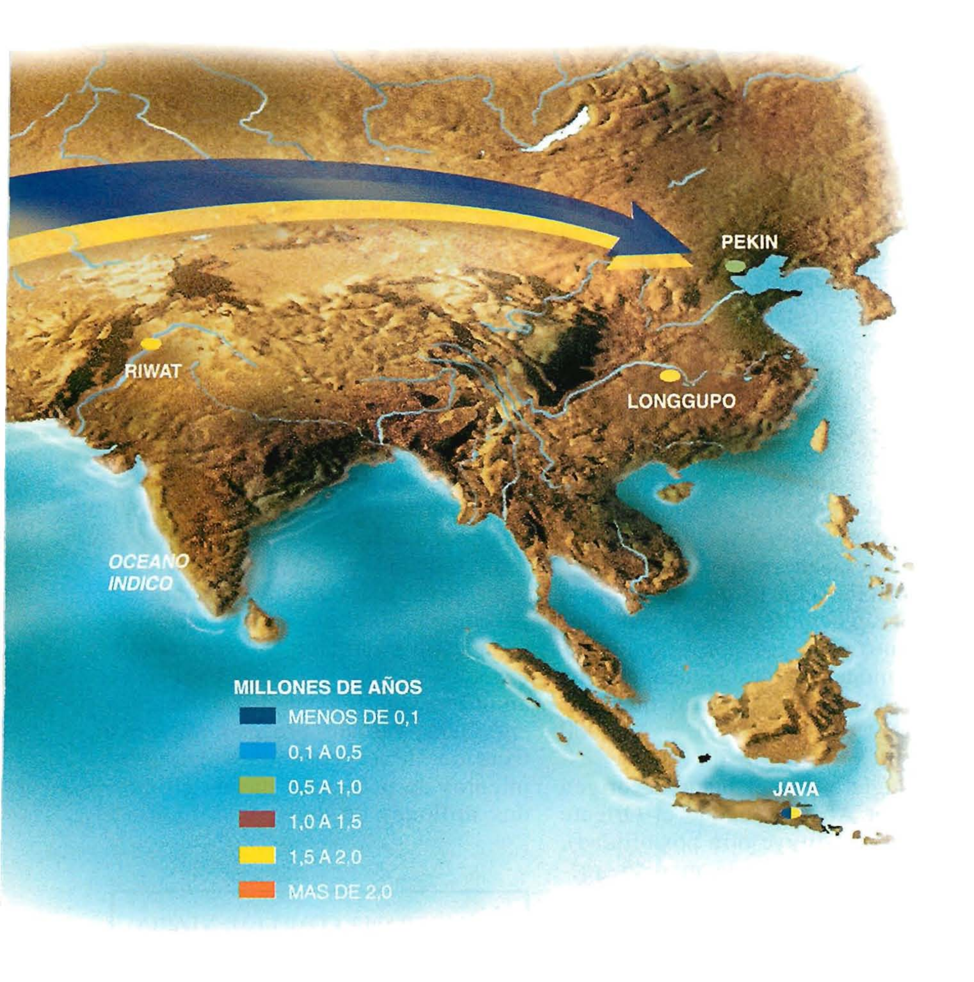
Los yacimientos de Atapuerca y la evolución humana en el último millón de años

Hace 50.000 años existían tres especies humanas sobre la faz de la Tierra, que ocupaban regiones diferentes. En Europa, Oriente Próximo y Asia Central vivían los neandertales, en Java los últimos representantes de *Homo erectus* y en Africa seres humanos como nosotros, es decir, de la especie *Homo sapiens*. No sabemos bien quiénes poblaban otras partes del Viejo Mundo, el este del continente asiático, por ejemplo.

Sin embargo, hace 20.000 años sólo quedaban ya humanos modernos, que se encontraban también en el territorio habitado hasta entonces por las otras especies. Este sorprendente final de nuestra historia evolutiva viene avalado por los últimos hallazgos de fósiles y las nuevas dataciones, y demuestra que la geometría de la evolución humana no se diferencia en su carácter ramificado de la de otros grupos biológicos. Queda, pues, muy claro que los neandertales no evolucionaron en Europa para dar lugar a los humanos modernos, sino que fueron reemplazados por éstos, como sucediera en Java y posiblemente en otra partes.

Sin embargo, conforme se retrocede en el tiempo, siguiendo la pista de neandertales, humanos modernos y *H. erectus*, cada vez es más difícil distinguir los fósiles de unas líneas evolutivas de los restos de otras. Esto se debe a que la evolución ha sido divergente en el último millón de años, o tal vez desde mucho antes, es decir, que ha habido una creciente diferenciación regional (de los neandertales en Europa, *H. erectus* en Asia oriental y los humanos modernos en Africa), a partir de un ancestro compartido, tal vez *Homo ergaster*.

Si bien parece confirmarse que no había intercambio de genes entre los productos finales de las tres líneas evolutivas, ya demasiado diferenciados, es posible que sí lo hubiera en una fase anterior, hace cientos de miles de años. Y éste es el núcleo de un intenso debate en la actualidad.



En contra de lo que suele pensarse, del hallazgo y la observación de los fósiles no surgen directamente las teorías evolutivas. De lo que se trata es de averiguar en cuál de las diferentes posibilidades encaja mejor la prueba fósil. Yo me encuentro, como Ian Tattersall, entre los partidarios de evoluciones fundamentalmente independientes de las tres grandes líneas. Además, como muchos otros, pienso que neandertales y humanos modernos están evolutivamente más próximos entre sí que cualquiera de ellos con respecto a *H. erectus*.

A este hipotético antepasado común de neandertales y humanos modernos se le llamó en tiempos *H. sapiens* "arcaico". Ahora que se ha vuelto a poner de moda considerar a los neandertales una especie diferente, *Homo neanderthalensis*, se ha rescatado para los "arcaicos" un viejo nombre: *Homo heidelbergensis*. Esta especie habría vivido, como cuenta Tattersall, en Africa y Europa entre hace unos 600.000 y hace unos 200.000 años. Sobre este tema tienen mucho que decir los trabajos en los yacimientos de la Sierra de Atapuerca que lleva a cabo un equipo dirigido por Eudald Carbonell, de la Universidad Rovira i Virgili en Tarragona, José María Bermúdez de Castro, del Museo Nacional de Ciencias Naturales de Madrid, y el grupo de la Universidad Complutense de Madrid que dirige el autor de estas líneas. Uno de estos yacimientos, la Sima de los Huesos, nos permite ver mucho más claro el origen de los neandertales. Ahora sabemos que fue ésta una larga gestación, que tuvo lugar en Europa durante cientos de miles de años. Nosotros creemos que todos los fósiles europeos comúnmente incluidos en la especie *H. heidelbergensis* (con su ejemplar tipo, la mandíbula de Mauer, cerca de Heidelberg, entre ellos) son, en realidad, antepasados exclusivamente de los neandertales. Para encontrar al antepasado común de neandertales y humanos modernos hay que mirar más hacia atrás en el tiempo, hacia los fósiles de la Gran Dolina y sus contemporáneos africanos.

JUAN LUIS ARSUAGA
Departamento de Paleontología,
Universidad Complutense de Madrid

de Olduvai en esta especie. De ser afirmativa la respuesta, *H. erectus* evolucionó en el este de Asia en una época temprana (recordemos que ahora se piensa que OH9 tiene casi 1,4 m.a.), y una rama de la especie volvió a Olduvai en Africa. Pero si las nuevas dataciones asiáticas son correctas, parece más probable que cuando sepamos más sobre OH9 y fósiles similares encontraremos que pertenecían a una especie de homínido completamente diferente.

El extremo opuesto del continente euroasiático se hallaba, como he indicado, aislado también de la corriente principal de la evolución humana. Según vimos, los humanos parecen haber llegado a Europa bastante tarde. En esta región los primeros yacimientos arqueológicos convincentes, con instrumentos toscos, aparecen hace unos 800.000 años (aunque en el Levante mediterráneo, a un paso de Africa, el yacimiento de 'Ubeidiya ha proporcionado instrumentos achelenses datados en 1,4 m.a., tan antiguos como cualquiera de los encontrados más al sur). Pero no hay rastro de los autores de los instrumentos.

Este hueco empieza a ser llenado ahora gracias a los descubrimientos de Eudald Carbonell, de la Universidad de Tarragona, y sus colegas en el yacimiento kárstico de la Gran Dolina en la Sierra de Atapuerca, en la provincia de Burgos. Las excavaciones de 1994 aportaron numerosos instrumentos de piedra bastante elementales, más algunos restos de fósiles humanos, de los que el más completo es un fragmento de la parte superior del rostro de un individuo no adulto. Todos provienen de un nivel datado en más de 780.000 años. No se encontraron indicios de tecnología achelense entre los instrumentos, y los investigadores han señalado varios rasgos primitivos en los fósiles, que atribuyeron provisionalmente a *H. heidelbergensis*. Esta es la especie en la que, cada vez más, se incluyen los especímenes antes clasificados como *H. sapiens* "arcaicos". Carbonell y su grupo consideran esos fósiles el punto de partida para una línea europea autóctona que gradualmente evolucionó hasta los neandertales. Estos últimos, homínidos dotados de un cerebro grande, se conocen sólo en Europa y Asia occidental, donde florecieron en el período comprendido entre hace unos 200.000 años y hace 30.000 años, cuando sucumbieron, extinguiéndose, ante los *H. sapiens* invasores.

IAN TATTERSALL nació en Inglaterra y creció en Africa oriental. Es director del departamento de antropología del Museo Americano de Historia Natural de Nueva York. Entre sus últimos libros publicados recordaremos *The Fossil Trail: How We Know What We Think We Know about Human Evolution* y *The Last Neanderthal: The Rise, Success, and Mysterious Extinction of our Closest Human Relatives.*

Sin embargo, ésta no es la única posibilidad. Con sólo una descripción provisional de los fósiles disponibles de la Gran Dolina, muy fragmentarios, resulta difícil estar seguro. Parece igualmente posible que sean restos de homínidos que hicieron una incursión inicial desde Africa a Europa, pero fracasaron a la hora de establecerse allí por mucho tiempo. Se conocen representantes de *H. heidelbergensis* también en Africa, hace 600.000 años; esta especie muy probablemente recolonizó Europa más tarde. Allí, habría dado lugar a los neandertales, mientras una población africana menos especializada fundaría el linaje que finalmente desembocaría en *H. sapiens.*

En otro yacimiento, a sólo un kilómetro de la Gran Dolina, Juan Luis Arsuaga, de la Universidad Complutense de Madrid, y sus colegas han descubierto una copiosa cantidad de fósiles humanos de hace unos 300.000 años, en exquisito estado de conservación. Se dice que éstos se parecen a los neandertales en ciertos aspectos, pero de ninguna manera son completamente neandertales. Y aunque los autores recalcan que los neandertales (y quizás otras especies emparentadas) son un producto autóctono europeo, los fósiles de la Sima de los Huesos no guardan necesariamente relacion con sus vecinos de la Gran Dolina.

Nacidos en Africa

Los lectores asiduos de *Investigación y Ciencia* estarán familiarizados con los modelos de "continuidad regional" y de "origen único africano", que compiten para explicar la emergencia de nuestra propia especie, *H. sapiens* [*véase* "Evolución multiregional de los humanos", de Alan G. Thorne y Mildford H. Wolpoff, y "Origen africano reciente de los humanos", por Allan C. Wilson y Rebecca L. Cann; junio de 1992]. El primero de estos modelos sostiene que la especie, muy primitiva, *H. erectus* (incluido *H. ergaster*) no es más que una variante antigua de *H. sapiens*; defiende, además, que en los últimos dos millones de años de historia de nuestra estirpe se produjo una corriente de poblaciones entrelazadas de esta especie que evolucionaron en todas las regiones del Viejo Mundo, cada una de las cuales se adaptó a las condiciones locales, aunque todas se hallaban firmemente vinculadas entre sí por intercambio génico. La variabilidad que vemos hoy entre las principales poblaciones geográficas humanas sería, de acuerdo con este modelo, la postrera permutación de tan largo proceso.

El modelo alternativo, que encaja mucho mejor con lo que conocemos del proceso evolutivo en general, propone que todas las poblaciones humanas modernas descienden de una misma población ancestral que surgió hace entre 150.000 y 100.000 años. El registro fósil, aunque escaso, sugiere que el lugar de origen estuvo en Africa (aunque el Oriente Próximo constituye otra posibilidad). Quienes proponen este modelo apelan a los estudios de biología molecular comparada para sustentar la tesis de que todos los humanos actuales descienden de una población africana.

A la vista de lo que ya he expuesto acerca de los papeles periféricos desempeñados en la evolución humana por las poblaciones antiguas del este de Asia y de Europa, no debería sorprender que, entre los dos modelos, me decida por el que defiende un origen único y relativamente reciente para *H. sapiens*, a buen seguro en Africa (el continente que, desde el mismo principio, ha sido el motor de la corriente principal de innovaciones en evolución humana). La aparición de los humanos modernos es un drama reciente que se interpretó con un complejo telón de fondo de diversificación evolutiva de los homínidos, pero el registro fósil muestra que, desde los primeros momentos, Africa fue el centro del que constantemente brotaban nuevos linajes de homínidos. Desde luego en Europa y Asia oriental ocurrieron interesantes procesos evolutivos, pero afectaron a poblaciones que no sólo procedían de Africa, sino que también fueron sustituidas por emigrantes africanos. En Africa nació nuestra estirpe, y desde que los homínidos abandonaron los límites del bosque, este continente ha generado sucesivas olas de emigrantes hacia todas las partes del Viejo Mundo. Lo que vemos en el registro humano fósil que conocemos hoy es, ciertamente, un pálido reflejo de lo que debe de haber sido una secuencia muy compleja de acontecimientos.

Y lo que reviste mayor interés: las nuevas dataciones del este de Asia muestran que la movilidad humana se remonta a los mismos orígenes de un cuerpo humano moderno. Las dataciones europeas demuestran que, aunque en su suelo evolucionaron variantes regionales, la historia de la ocupación puede no haber sido en absoluto lineal. Aunque, como siempre, las nuevas pruebas del pasado humano más remoto han servido principalmente para subrayar la complejidad de acontecimientos en nuestra evolución. Sólo podemos esperar que un registro fósil más amplio revele los detalles de lo que, sin duda, fue un proceso muy intrincado de especiaciones y movimientos de población en los últimos dos millones de años.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THREE NEW HUMAN SKULLS FROM THE SIMA DE LOS HUESOS MIDDLE PLEISTOCENE SITE IN SIERRA DE ATAPUERCA, SPAIN. J. L. Arsuaga *et al.* en *Nature*, vol. 362, n.º 6420, páginas 534-537; 8 de abril 1993.

AGE OF THE EARLIEST KNOWN HOMINIDS IN JAVA, INDONESIA. C. C. Swisher III *et al.* en *Science*, volumen 263, n.º 5150, págs. 1118-1121; 25 de febrero, 1994.

A PLIO-PLEISTOCENE HOMINID FROM DMANISI, EAST GEORGIA, CAUCASUS. L. Gabunia y A. Vekua en *Nature*, vol. 373, n.º 6514, páginas 509-512; 9 de febrero, 1995.

LOWER PLEISTOCENE HOMINIDS AND ARTEFACTS FROM ATAPUERCA-TD6 (SPAIN). E. Carbonell *et al.* en *Science*, vol. 269, n.º 5225, páginas 826-830; 11 de agosto, 1995.

EARLY *HOMO* AND ASSOCIATED ARTEFACTS FROM ASIA. W. Huang *et al.* en *Nature*, vol. 378, n.º 6554, páginas 275-278; 16 de noviembre, 1995.

WHOSE TEETH? J. H. Schwartz e I. Tattersall en *Nature*, vol. 381, n.º 6579, páginas 201-202; 16 de mayo, 1996.

LATEST *HOMO ERECTUS* OF JAVA: POTENTIAL CONTEMPORANEITY WITH *HOMO SAPIENS* IN SOUTHEAST ASIA. C. C. Swisher III *et al.*, en *Science*, vol. 274, n.º 5294, págs. 1870-1874; 13 de diciembre, 1996.

Frente al cansancio, Ginsana te rehace

Por qué te CANSAS ¿Sabes cómo reacciona tu organismo para afrontar el estrés del trabajo y de tu ritmo de vida? Solicita más oxígeno para quemar glucosa y así obtiene la energía que le falta. Por eso, cuando el aporte de oxígeno a los tejidos del organismo se hace insuficiente, fallan las fuerzas y aparece el cansancio, el abatimiento y la disminución de la concentración.

Extracto de ginseng G115 GINSANA es el extracto de raíz de ginseng, denominado G115, desarrollado mediante un especial proceso de selección de los principales principios activos contenidos en el ginseng, por lo que ayuda a rehacerte frente a situaciones de cansancio.

P.V.P. IVA: 1.195 ptas. ✚ VENTA EN FARMACIAS

CPS 97017





Boehringer Ingelheim

Lea detenidamente las instrucciones de uso. En caso de duda consulte a su farmacéutico.

PUZZLE SALUD

John Horgan

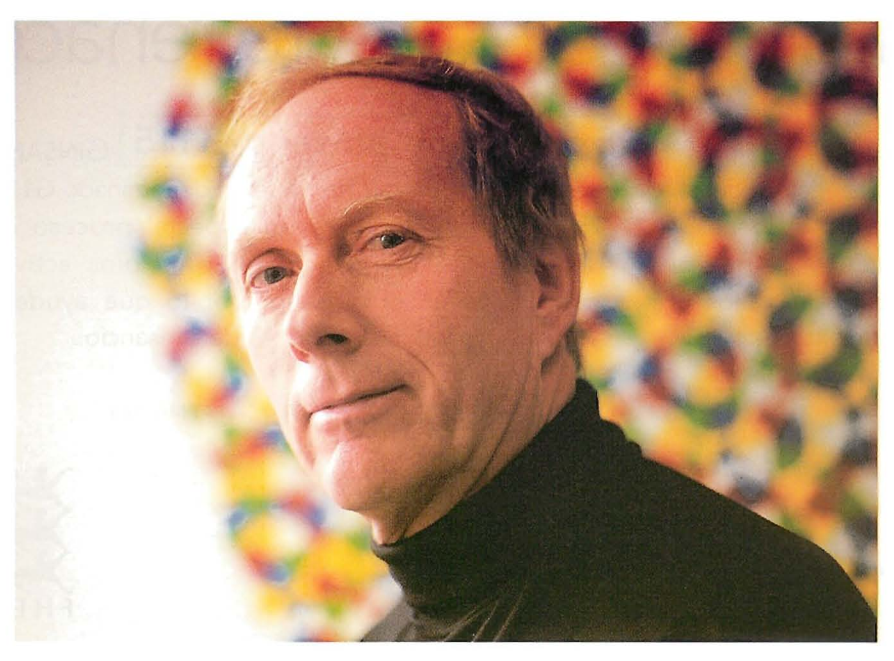
RONALD L. GRAHAM: Un juego malabar

Ronald L. Graham, director de investigación de los Laboratorios AT&T Bell, empieza con dos bolas, echándolas al aire con una mano mientras charla distraídamente con el visitante. Toma otra bola de un estante, y otra más, haciéndome saber que el récord del mundo de malabarismo está en nueve. El maneja seis con soltura, y se atreve con siete. Señalando con un gesto de la cabeza la fotografía colgada de la pared donde se le ve con doce bolas en el aire, revela que se trata de una ilusión óptica generada por su hija Ché, que se dedica a la fotografía y es especialista en trucaje digital.

Se sienta en una silla para ganar más espacio vertical, y se pone a jugar con cinco bolas, cambiando las figuras de cuando en cuando, sin que se acierte a distinguir sus manos por la rapidez con que se mueven. Su despacho de Murray Hill (Nueva Jersey), en la planta baja, decorado con un jardín de piedras en miniatura —con su borboteante reguero y todo—, un pliego de ideogramas chinos y una reproducción de "*Night into Day*", de M. C. Escher, no da para seis bolas.

Como le gusta decir a Graham, "el malabarismo es una metáfora". Cada una de estas bolas de silicona podrían referirse a diferentes aspectos de su vida, si dejamos de lado que una representación precisa requeriría demasiadas bolas. Como director de los Laboratorios de Investigación AT&T Bell, en los que ingresó hace 35 años, cuando todavía se llamaban Laboratorios Bell, ha formado a algunos de los matemáticos e informáticos de más alto nivel de todo el mundo. Su trabajo sobre la teoría de números y otras disciplinas matemáticas le valieron el prestigioso premio Polya en 1972 y ser nombrado miembro de la norteamericana Academia Nacional de Ciencias en 1985.

Lleva sobre sus espaldas una pesada carga de diversas responsabilidades profesionales. Profesor a tiempo parcial de la Universidad Rutgers, da seminarios y conferencias por todo el mundo. Es uno de los más activos miembros de la Sociedad Americana de Matemáticas y de la Academia Nacional de Ciencias, y forma parte de 40 (sí, 40) comités editoriales de revistas de matemáticas e informática. Durante los dos últimos años ha participado en un selecto comité del Consejo Nacional de Investigación sobre criptografía, que el pasado mes de diciembre hizo público un informe de 750 páginas en el que se recomendaba que la legislación norteamericana sobre la codificación en clave fuera menos restrictiva.



GRAHAM impulsa "descabelladas" ocurrencias en AT&T.

Las hazañas de Graham fuera del dominio de las matemáticas son, asimismo, múltiples. Consumado malabarista y gimnasta, a sus 61 años se atreve todavía a dar el triple salto mortal en un trampolín y es capaz de mantenerse en equilibrio sobre una mano en un pedestal basculante. Llegó a ser un gran jugador de ping-pong, de bolos (con dos juegos perfectos en su haber). Domina el mandarín: afirma que en una conversación telefónica puede pasar por chino.

Justo a la salida del despacho de Graham, en varios cuartos trasteros se apilan los cachivaches para ejercitar la habilidad: un bota-bota de talla grande, un monociclo, un juego de ajedrez esférico y hasta una caja de las llamadas losetas aperiódicas, que cuando se acoplan correctamente pueden llenar un plano sin que se repita nunca el mismo motivo. Graham saca un balón de baloncesto trucado cuyo centro de gravedad asimétrico dificulta hacerlo girar sobre un dedo. "Es una batalla constante", susurra mientras mantiene la bola girando en alto. Con Graham todo parece fácil.

En realidad, puede que la hazaña más impresionante de Graham sea la de no aparentar el supergenio que en el fondo debe ser. Alto, flaco y de cabellos claros, con una sonrisa fácil y voz de tenor, es la sencillez personificada. En la conversación, cambia de un tema a otro, saltando sin solución de continuidad de las implicaciones del teorema de Gödel al secreto de su éxito, pasando por los peligros psicológicos de la gimnasia. La mejor manera de desentrañar un problema, me confía, ya sea un triple salto mortal o un enigma de teoría de grafos, es "desmenuzarlo en sus componentes, comprender cada parte y desentrañar cómo encajan las partes".

Sólo en raras ocasiones enseña las fuerzas que le impulsan. El mes de

septiembre pasado, la muerte de uno de sus mejores amigos, el legendario matemático húngaro Paul Erdös, le hizo comprender el poco tiempo del que dispone para aprender nuevas habilidades y resolver nuevos problemas. Incluso ha pensado en confeccionar un recordatorio, un *memento mori*, dice en latín, con un pliego de papel cuadriculado de 100 casillas de lado, 10.000 casillas en total: "Cada día que vienes, marcas una X en un recuadro." Dibuja una X en el aire y se detiene, como contemplando una hoja invisible frente a él. Es muy probable, añade, que no llegue a rellenar la hoja.

La historia de Graham es una prueba de que los matemáticos pueden brotar de la tierra en apariencia más árida. Nació en Taft (California), a unos 200 kilómetros al noroeste de Los Angeles, donde su padre trabajaba en los campos petrolíferos. La familia del pequeño Ron se trasladaba de un sitio a otro del país siguiendo los cambios de trabajo de su padre, que se empleaba sobre todo en los astilleros.

Aunque no pasó nunca más de dos años seguidos en una misma escuela, Graham demostró sin embargo una inclinación y una aptitud prodigiosa para las matemáticas y las ciencias. A los 15 años, ganó una beca de la Fundación Ford para la Universidad de Chicago, que tenía una bolsa de estudios para jóvenes superdotados. Como deporte de equipo, se apuntó a un programa llamado Acroteatro, en el que se enseñaba gimnasia, malabarismo y trampolín. (Graham mide casi un metro noventa, "demasiado grande" para la gimnasia.) "Actuamos durante todo el año en los institutos para demostrar lo divertida que es la Universidad de Chicago".

Tras haber pasado tres años en Chicago, su padre, preocupado de las tendencias izquierdistas de la universidad, le convenció para que se trasladara a una "facultad agradable y en la tradición americana", la Universidad de California en Berkeley. Graham se matriculó en ingeniería electrónica, pero tras sólo un año, ante la perspectiva de ser llamado a filas, se alistó voluntario en la Fuerza Aérea.

Destinado a Alaska, trabajaba como especialista en comunicaciones por la noche y de día acudía a las clases en la Universidad de Alaska en Fairbanks. Una vez acabado el voluntariado, regresó a Berkeley y obtuvo la licenciatura en matemáticas. En 1962 ingresó en los Laboratorios Bell, donde progresó rápidamente en el escalafón directivo a la vez que continuaba su propia investigación.

Uno de sus intereses matemáticos recurrentes es la teoría de Ramsey, concebida hace casi 70 años por el matemático británico Frank P. Ramsey. "El desorden completo es imposible: ésa es la filosofía de fondo de la teoría de Ramsey", dice Graham. "En cualquier estructura extensa, aparentemente desordenada, existen subestructuras menores que se comportan mucho mejor."

Los problemas de la teoría de Ramsey se proponen a veces como "adivinanzas de reuniones". ¿Cuánta gente debe ser invitada a una reunión para asegurarse que un número determinado de personas se conozcan todas entre sí o se desconozcan mutuamente? Hallar el llamado número de Ramsey se torna extremadamente difícil a medida que crece el número de huéspedes. En 1993 dos matemáticos establecieron que el número de Ramsey para una reunión con al menos cuatro conocidos mutuos o cinco desconocidos mutuos es de 25; la demostración requirió un cálculo que consumió el equivalente de 11 años de computación en una estación de trabajo.

Todavía no está claro si la teoría de Ramsey acabará por resultar útil. Pero, señala Graham, con frecuencia las áreas de la matemática que parecen completamente carentes de utilidad resultan tener aplicaciones prácticas. La teoría de números, tema de la tesis doctoral de Graham y por entonces "pura entre las puras", es ahora una parte crucial de la criptografía. Muchos sistemas criptográficos sacan partido del hecho de que, si bien multiplicar dos números de 100 cifras es tarea bastante sencilla (al menos para un ordenador), descomponerlo en factores primos resulta increíblemente duro.

Por otro lado, añade Graham, "puede que justo a la vuelta de la esquina aparezca una gran idea nueva" que facilite la factorización de números muy grandes. Algunos expertos piensan que con la computación cuántica, en la que se aprovechan las extrañas propiedades del reino de los cuantos para lograr proezas que escapan a las capacidades de los ordenadores convencionales, se conseguirá ese adelanto. "Ese es uno de mis principales cometidos de este momento, ayudar a impulsar esa ocurrencia descabellada", remarca.

El mayor impulsor de la mente de Graham era Erdös, a quien nuestro hombre califica de "uno de los más grandes enunciadores de problemas de todos los tiempos". Se conocieron en 1963, y su primer artículo conjunto apareció en 1972. Graham mantenía en su casa una "habitación de Erdös" para su mentor, que nunca tuvo familia ni trabajo fijo, sino que viajaba por todo el mundo alojándose en las casas de sus amigos.

Un artículo de Graham de 1979 ayudó a popularizar el concepto de "número de Erdös", que refleja el grado de separación de un matemático respecto a Erdös. Los que han escrito un artículo con Erdös tienen un número de Erdös igual a uno, los que han escrito un artículo con un miembro de ese grupo, pero no con Erdös mismo, poseen un número de dos, y así sucesivamente.

Graham experimenta poca dificultad en cambiar de las matemáticas a otras actividades, en parte porque las matemáticas guardan relación con muchas de las cosas que él hace. Por ejemplo, muchos de los 3000 miembros de la Asociación Internacional de Malabaristas, de la que Graham ha sido presidente, están en contacto con las matemáticas o los ordenadores, y el malabarismo ha inspirado a algunos matemáticos ingeniosos [*véase* "La ciencia del malabarismo", por Peter J. Beek y Arthur Lewel; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 1996].

Además, últimamente el colaborador más cercano de Graham es Fan Chung, una profesora de matemáticas de la Universidad de Pennsylvania con quien se casó en 1983. (Sus dos hijos, Ché y Marc, provienen de un matrimonio anterior.) Los dos han abordado recientemente un problema relacionado con la distribución de las comunicaciones telefónicas. Una manera ideal de evitar que las llamadas converjan sobre la misma ruta, saturándola, consiste en asignarles rutas aleatorias, pero llegar a la aleatoriedad no es nada sencillo. Chung y Graham han demostrado que la mayoría de las ventajas de la aleatoriedad pueden obtenerse con métodos "cuasialeatorios" mucho más fáciles de diseñar y de ejecutar.

Graham y su mujer simplemente han mejorado una conjetura propuesta por Erdös y un colega años atrás, en 1935. La conjetura sostenía que el número de puntos de un plano necesarios para generar un polígono convexo de n lados es una función terriblemente complicada de $n+1$, o $f(n)+1$. "Nos sacamos el uno de encima", dice alegremente Graham.

Ciencia y sociedad

Infraestructuras

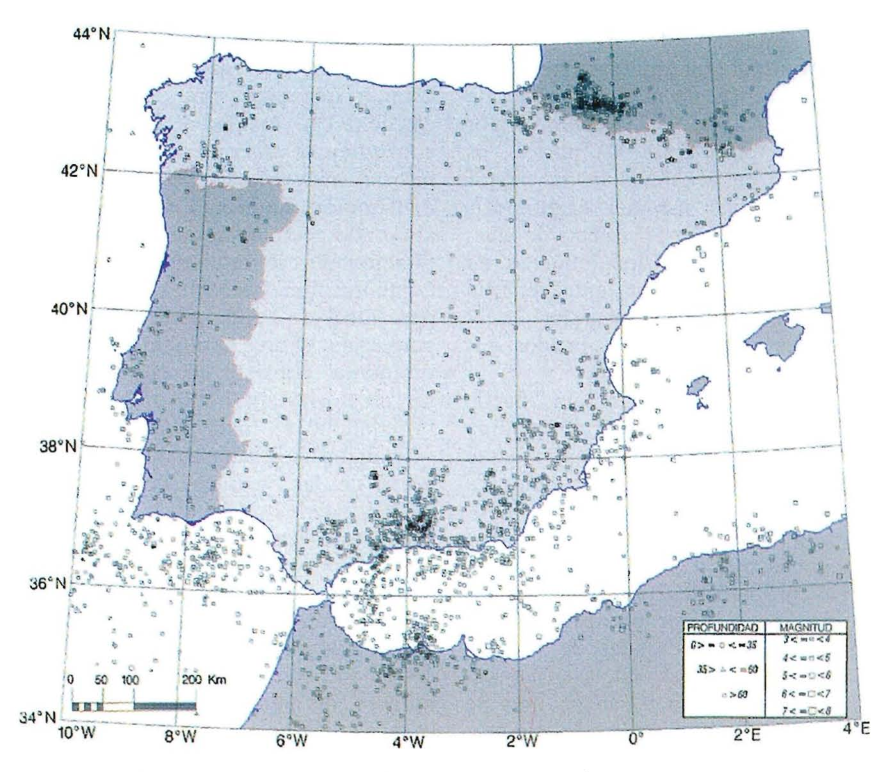
Red sísmica española

España es un país de sismicidad moderada, entendiendo por tal la que registra terremotos destructores separados por intervalos de tiempo superiores a 100 años. (El último episodio destructor ocurrió el 25 de diciembre de 1884 en Andalucía.) Sin embargo, la constancia en épocas pasadas de terremotos importantes determinó que, desde los albores de la sismología, se instalasen observatorios en nuestro país.

En el primer decenio del siglo se crean los observatorios del Ebro (Tortosa), Granada, Fabra (Barcelona) y Almería. Estos observatorios, algunos de los cuales siguen hoy manteniendo operativa la instrumentación casi original, registraban terremotos de cierta importancia. Por eso, los datos que más abundan de este período inicial corresponden a seísmos del área próxima a la península Ibérica, como es la zona de Azores, Italia y Grecia y norte de Africa, y los de notable impacto ocurridos muy lejos, por ejemplo el de San Francisco de 1906.

La vinculación de los terremotos a fallas en el terreno se manifestó con el sismo de San Francisco. Se inició entonces el estudio de las características espacio-temporales de los terremotos y su cuantificación energética, expresada en términos de magnitud. Estos trabajos requerían una instalación de sismógrafos más sensibles, capaces de detectar movimientos no sentidos, y, lo que revestía mayor interés, un control de tiempo en los instrumentos que hiciese que los relojes de cada observatorio estuviesen contrastados con una base de tiempo común, requisito indispensable para poder efectuar una localización del terremoto.

El problema del mantenimiento de relojes precisos retardó el avance de la sismología experimental en la primera mitad de siglo. Sin ese ajuste resulta imprescindible que las ondas registradas en cada observatorio puedan identificarse por su tiempo de llegada. La aparición de relojes de cuarzo a principio de los años cincuenta revolucionó esta técnica del control horario y permitió que los instrumentos de observatorio tuviesen una base de tiempo común, mediante comparación con señales horarias transmitidas por emisoras especializadas.



1. Sismicidad de la península Ibérica y áreas adyacentes para el período 1964-1994. La clasificación de los terremotos se ha hecho atendiendo a su tamaño (magnitud) y la profundidad

A principios de los años sesenta, y en el marco de la verificación de los tratados de no proliferación nuclear, se instalaron un centenar de estaciones de una red con instrumentos idénticos, la red estándar sismológica de cobertura mundial (WWSSN). En la península Ibérica se instalaron estaciones en Toledo, Málaga y Oporto. Esta red disponía ya de instrumentos de amplificación elevada y con dos rangos de captación del movimiento, uno denominado período corto y amplificación típica de 50.000 veces el movimiento del suelo y otro de período largo y amplificación más baja en el intervalo 750-6000. Tales instrumentos disponían ya de un sistema de control de tiempo basado en reloj de cuarzo y contrastación periódica con señales horarias precisas, y un registro sobre papel fotográfico.

Por esa época, la red sísmica de España constaba de las estaciones de Toledo y Málaga, incluidas en la red WWSSN, más los observatorios Fabra, Ebro, Alicante, Logroño, Granada, Almería, San Fernando y Santiago de Compostela, con instrumentación muy heterogénea y de una inferior calidad y prestaciones. Esta red sísmica poseía un nivel de detección de terremotos, dependiendo de las zonas, próximo a magnitud 4, insuficiente para el control de la sismicidad del país. El proceso de aprovechamiento de los datos y su transmisión, además de costoso, era de una efectividad muy dudosa. En cada observatorio existía personal técnico capaz de reparar estos instrumentos y también personal con conocimiento sismológico que interpretase los registros obtenidos. Una vez realizada la interpretación, se codificaba la información para su envío

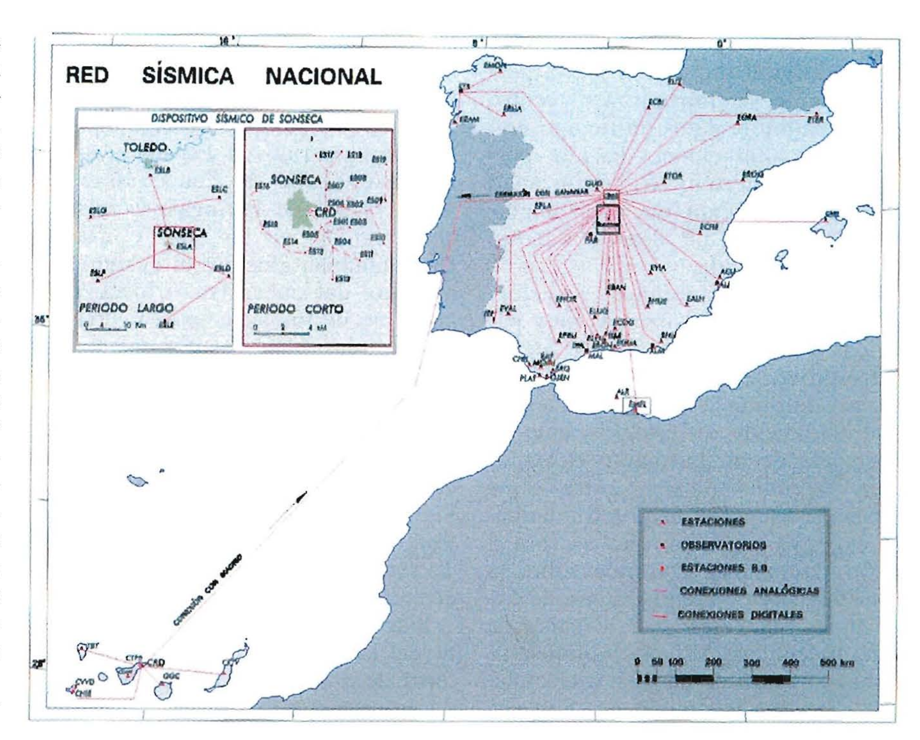
cifrado por las oficinas postales de telégrafos a un centro de cálculo en Madrid, así como para el intercambio entre los distintos observatorios. En este centro, utilizando métodos gráficos y numéricos, se efectuaba un cálculo de la situación y características del terremoto.

A finales de los setenta y principio de los ochenta se dio un cambio sustancial en la red sísmica existente, introduciendo el concepto de recepción de las señales sísmicas en tiempo real. Se recurría, pues, a las telecomunicaciones para centralizar en un emplazamiento único los datos producidos por todos los observatorios. Además de las mejoras introducidas en la percepción de las señales en cada observatorio, éstas se enviaban a un centro común de forma instantánea para poder procesarlas y ofrecer de forma inmediata la evaluación espacio-temporal del sismo (es decir, su localización y tiempo origen) y su magnitud.

La distribución de terremotos en la península Ibérica y áreas adyacentes nos revela la existencia de una notable sismicidad en el mar. Además, atendiendo a su profundidad, podemos distinguir tres tipos de terremotos: superficiales, intermedios y profundos. Conocidas estas dos características, la red sísmica debe disponer de métodos de cálculo que permitan determinar terremotos en lugares exteriores a la red y discriminar entre terremotos intermedios y profundos.

Para determinar sismos en lugares exteriores a la red, los cálculos se completan con los provenientes de una subred en Sonseca (Toledo). En relación a los terremotos intermedios y profundos, un análisis morfológico de sus ondas registradas en los observatorios permite abordar la localización a profundidades inusuales para el cálculo normal de terremotos.

La red sísmica nacional consta de 40 estaciones u observatorios no atendidos por personal, que se han instalado en lugares poco transitados y de bajo ruido distribuidos por zonas de actividad sísmica. Cada estación posee uno o tres sensores (sismómetros) que registran el movimiento (en las direcciones vertical, norte-sur, este-oeste) del suelo al paso de las ondas sísmicas. Los sensores captan el movimiento del suelo expresado en su velocidad para distintos intervalos de frecuencia (período corto, período largo, banda ancha) o responden a la aceleración del suelo (acelerómetros).



2. Distribución de estaciones sísmicas, observatorios y estaciones de banda ancha de la red de alerta en tiempo real de la red sísmica española. En el recuadro aparece la distribución de estaciones de la antena sísmica de Sonseca conectada en tiempo real al Centro de Recepción de la Red Sísmica

Existen 50 acelerógrafos instalados fundamentalmente en el sur y sureste de España. En caso de terremoto sentido, disparan sus sistemas de registro. Sus datos, además de servir para una localización precisa del terremoto en un momento posterior, proporcionan la historia temporal del movimiento del suelo al paso de un terremoto fuerte, de gran interés en ingeniería sísmica.

En relación con la red de sensores de período corto y enlace vía teléfono en líneas dedicadas que conforman la red de alerta sísmica se disponen de tres sistemas de adquisición. Los datos recibidos se procesan mediante un algoritmo de discriminación basado en la técnica STA/LTA (promedio de señal en intervalo corto de tiempo/intervalo largo de tiempo) que permite distinguir si la información que se recibe es de origen sísmico explosivo o bien si procede de un ruido. Se cuenta con un sistema de seguridad, el DATASEIS, de almacenamiento de esos datos.

Pero las estaciones de corto período se tratan también en paralelo con otros dos sistemas de adquisición de datos. En el primero, la detección se realiza aquí en el dominio de la frecuencia de la señal sísmica de cada estación, formando una base de datos que incluye las formas de onda en una memoria compartida de 1 gigabit. A partir de este punto, la información pasa a dos estaciones de trabajo donde se determinan, previa identificación de fases, las coordenadas hipocentrales y magnitud del sismo. La información final se distribuye a centros nacionales e internacionales. En el segundo sistema la detección se realiza en el dominio del tiempo, formándose además una base de datos integral de muy fácil acceso.

Aunque la calidad de los datos se ha mejorado con relación a los sistemas de registro de los años sesenta, quedan todavía problemas con la distorsión de las ondas. Cuando una estación se encuentra próxima a un epicentro, las amplitudes que registra no podían transmitirse por la línea telefónica sin sufrir alteraciones, lo que redundaba en pérdida de fiabilidad en la localización inmediata, las señales de terremotos de magnitud próxima o superior a 5 quedaban muy distorsionadas y no podían realizarse estudios posteriores basados en la observación de amplitudes. El reciente avance ocurrido en España con las comunicaciones HISPASAT ha supuesto la transfor-

mación de la red sísmica, pues el dato en digital procedente de la propia estación se transmitirá al centro de recepción de datos en tiempo real sin sufrir alteraciones, lo que permite estudiar terremotos en un rango de magnitud menor que 2 a magnitud mayor que 5,5 usando además sensores de banda.

Las explosiones químicas o nucleares producen ondas sísmicas muy parecidas a la de los terremotos. Su registro provoca la indeterminación, en el caso de tratarse de explosiones no controladas, de si estamos ante la existencia de un terremoto o explosión. Algunos países, entre ellos España, pertenecen al grupo mundial de expertos sísmicos que asesora a la Conferencia de Desarme sobre la discriminación e identificación de explosiones nucleares. Así, España, de acuerdo con los Estados Unidos, se ha hecho cargo de un dispositivo sísmico (antena sísmica) en Sonseca (Toledo), cuya finalidad principal es la de detección de eventos sísmicos a distancias regionales y telesísmicas y su posible discriminación e identificación. Esta red, cuyos datos son recibidos en el centro de recepción de datos de la red sísmica, proviene de una serie de sismómetros instalados en pozos entre 20-50 metros de profundidad que les permite una recepción de señales sísmicas muy débiles. Estas señales se tratan de forma algo diferente de las provenientes de la red, puesto que el algoritmo de detección e identificación y el método utilizado para efectuar localizaciones de focos sísmicos están basados en la determinación del comportamiento de los frentes de ondas a su paso por el dispositivo, que actúa como una antena de radar.

Con la red descrita de instrumentos, ¿cuál es el umbral mínimo de detección de terremotos expresado en términos de magnitud? ¿Qué valores mínimos de magnitud está preparada para detectar nuestra red? El mínimo terremoto que puede detectarse con una localización fiable es de 1,5 de magnitud, o incluso inferiores si se trata de instantes en los que el ruido sísmico que acompaña a las estaciones es muy pequeño. Con este nivel de detección podemos asegurar que la actividad sísmica y la posible relación con la tectónica están aseguradas y, por tanto, la delimitación de fallas activas.

La información en tiempo real recibida en el Centro de Recepción de la red nacional constituye el elemento esencial del sistema de alerta. Al Centro Nacional de Información Sísmica le corresponde, ante todo, evaluar la localización, magnitud y otros parámetros dinámicos de cualquier terremoto ocurrido en España y áreas próximas (golfo de Cádiz, norte de Africa y sur de Portugal) y de manera regional en las islas Canarias. Debe también efectuar el cálculo inmediato del mecanismo focal responsable de los terremotos ocurridos en las áreas atlánticas por encima de un umbral de magnitud y evaluación de la probabilidad de generación de maremoto. Y, por supuesto, tiene que comunicar las alertas sísmicas a los centros internacionales de datos (Centro Sismológico Europeo-Mediterráneo, Centro Nacional de Información de Terremotos de los Estados Unidos, etcétera).

Estos sistemas automáticos constituyen la base fundamental del sistema de alarma del Centro Nacional de Información Sísmica, puesto que suministra al operador una solución rápida. Esta solución, validada mediante una comprobación con métodos exteriores, se remite a los centros de comunicación pertinentes. Posteriormente se inicia una búsqueda de información adicional (valores de intensidad) mediante la selección automática de teléfonos de puntos previamente fijados en la zona.

La red sísmica española es una parte activa de la red europea que conforman, como centros nodales, junto con la italiana del Instituto Nacional de Geofísica y el Laboratorio de Detección Geofísica de Francia, el Centro Sismológico Europeo Mediterráneo. Al estar enlazadas dichas redes, cualquiera de ellas puede actuar de servicio sismológico a escala europea.

JULIO MEZCUA RODRÍGUEZ
Instituto Geográfico Nacional

Salinidad

Plantas resistentes

La salinización de las tierras de cultivo constituye desde antiguo un grave problema para la agricultura, pues limita el rendimiento de las cosechas. En los regadíos de las zonas áridas y semiáridas, pensemos en algunas zonas de España, la evaporación del agua del suelo y la transpiración de la planta extraen agua pura, dejando en el suelo las sales que en principio estaban disueltas en el agua.

Las sales depositadas pueden ser de distinta naturaleza. La más abundante es el cloruro de sodio (NaCl). Se estima que un 30 % de los regadíos del mundo están afectados por la salinidad; sólo en California, las pérdidas en la producción agrícola superan los 500 millones de dólares cada año.

Existe, por tanto, una creciente necesidad de mejorar la tolerancia a la salinidad de los cultivos. En condiciones de salinidad, las plantas se enfrentan ante dos problemas distintos: evitar que el sodio ejerza su efecto tóxico en el interior de la planta y procurar que el vegetal tome agua del suelo. El primero es un problema de exceso de iones; el segundo, un problema osmótico.

En cuanto a tolerancia a la salinidad, no todas las plantas se comportan igual. Abundan especies silvestres con alta tolerancia al sodio y próximas, desde una perspectiva evolutiva, a las plantas cultivadas. Podríamos sacar partido de esa variabilidad para obtener variedades más tolerantes a la salinidad a través de la mejora genética. Pero ese enfoque no ha resultado muy eficaz. Hay otra alternativa: identificar los genes de las plantas que determinan la tolerancia a la salinidad y, luego, modificarlos para obtener plantas que se acomoden mejor a esa situación.

La mayoría de las plantas cultivadas son sensibles a concentraciones moderadas de sodio, por lo que, en general, mantienen bajas concentraciones de este catión en su interior. Así, el crecimiento de la judía se inhibe un 50 % cuando la concentración de sodio en el suelo es de 25 milimolar; en el caso de la cebada, el crecimiento se restringe en un 50 % a 100 milimolar de sodio. Las células vegetales, como las del resto de los organismos, mantienen en el citoplasma altas concentraciones de potasio (100 milimolar) y bajas de sodio (menores de 5 milimolar). Cuando la concentración citoplasmática de sodio es demasiado elevada, desplaza al potasio en sus funciones y bloquea la acción enzimática.

En la regulación de los niveles citoplasmáticos de sodio revisten particular interés los sistemas de transporte de iones a través de las membranas celulares. Los puntos fundamentales son la entrada de sodio en el interior celular, la salida de sodio de la célula y la acumulación de sodio en la vacuola, orgánulo éste

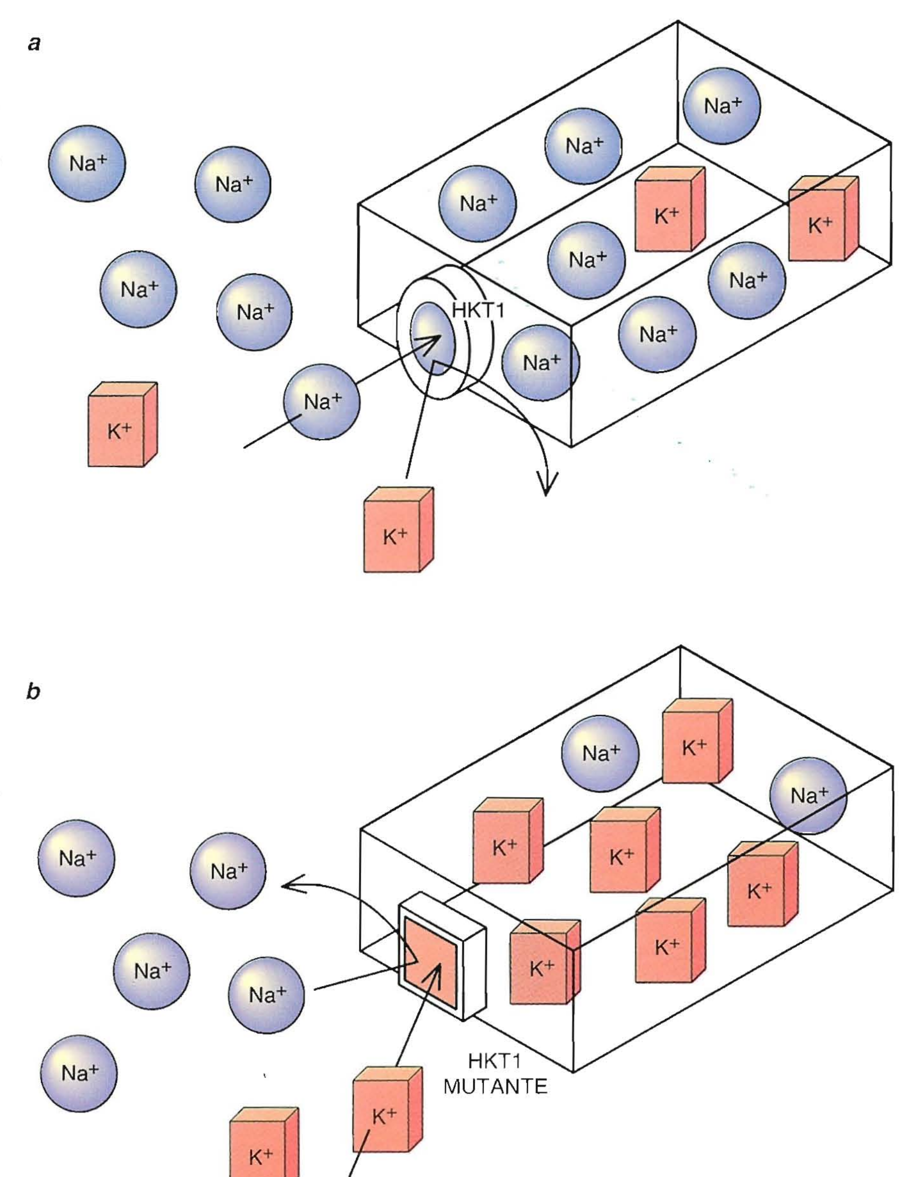
donde el sodio es menos tóxico. En la membrana celular existen proteínas transportadoras de iones especializadas en la acumulación de potasio en el interior celular. Cuando la concentración de sodio en el exterior es muy alta, desplaza al potasio y penetra en la célula a través de los transportadores de potasio. Una vez en el interior celular, el sodio se expulsará hacia el exterior o se acumulará en la vacuola. Para el bombeo de sodio al exterior y para su acumulación en la vacuola se requieren transportadores específicos.

La identificación de los transportadores de potasio y sodio y de los procesos de transporte de estos cationes podría permitir la modificación de los mismos para aumentar la tolerancia al sodio. Sabemos muy poco sobre estos transportadores y los genes que los determinan. Recientemente, se ha identificado en las células corticales de la raíz de trigo un transportador de alta afinidad de potasio. HKT1, que así se llama esta proteína, tiene por misión acumular potasio en la célula, aun cuando su concentración en el exterior sea muy baja (de orden micromolar). Además, cuando la concentración de sodio en el exterior es muy alta (por encima de los 10 milimolar) HKT1 permite el paso del sodio. En condiciones de baja concentración de potasio y alta concentración de sodio, que son las típicas de los suelos salinos, el sodio entra en la célula a través de HKT1 inhibiendo a su vez el transporte de potasio. Fenómeno que produce una disminución del contenido interno de potasio y un aumento del contenido de sodio.

Mediante técnicas de ingeniería genética se han creado versiones de HKT1 que muestran una mayor selectividad por el potasio frente al sodio. En estas nuevas versiones, el transporte de potasio no se inhibe tanto en presencia de altas concentraciones de sodio, al mismo tiempo que baja el transporte de sodio. Todos estos estudios se han llevado a cabo en levaduras, que son un modelo excelente para el estudio de diversos procesos moleculares propios de las plantas. En la levadura, las nuevas versiones de HKT1 incrementan la tolerancia a sodio.

La entrada de agua en la planta se debe a que en el interior de las células vegetales la concentración de solutos es mayor que en el exterior (menor potencial de agua). En condiciones de alta salinidad, disminuye la entrada de agua. Para recuperar ese flujo, la planta acumula solutos según dos estrategias. De acuerdo con la primera, acumula sodio en compartimentos celulares como la vacuola, donde no es tóxico. La segunda estrategia consiste en almacenar ciertos solutos que no son tóxicos, ni siquiera a concentraciones elevadas (solutos compatibles); de este tenor son la prolina, betaína, ácidos orgánicos, azúcares y otros. Bacterias y levaduras conocen también esta segunda estrategia. Mediante técnicas de ingeniería genética se ha producido una planta de tabaco que acumula altas concentraciones de manitol (un azúcar) y que tolera más sodio.

La tolerancia a la salinidad es un problema complejo en el que puede intervenir un gran número de genes relacionados con el transporte de potasio y sodio, la síntesis de solutos compatibles y la síntesis de ciertas enzimas especialmente sensibles al sodio. Los ejemplos aducidos nos revelan que las técnicas de ingeniería genética podrían contribuir a la obtención de plantas más tolerantes a la sal en un futuro no muy lejano.



Modelo de entrada de sodio en la célula vegetal. En los suelos salinos, el sodio entra en la célula a través del transportador HKT1 (a). *Mediante ingeniería genética se han creado versiones de dicha proteína que muestran una mayor selectividad por el potasio frente al sodio* (b)

FRANCISCO RUBIO MUÑOZ
Departamento de Biotecnología
Universidad Politécnica
Madrid

Mesencéfalo

Regionalización y desarrollo

El mesencéfalo ocupa la parte media o central del cerebro de los mamíferos. Durante el desarrollo embrionario, en el esbozo del cerebro, aparecen muy pronto tres abombamientos o vesículas sucesivas: vesícula prosencefálica (cerebro anterior), vesícula mesencefálica (cerebro medio) y vesícula rombencefálica (cerebro rómbico, por su forma romboidea).

En 1989, trabajando en el laboratorio de Rosa-Magda Alvarado-Mallart, del CNRS en París, descubrimos que, contrariamente a lo aceptado hasta ese momento, en la vesícula mesencefálica no estaba sólo el mesencéfalo en esbozo; también se desarrollaban, a partir de la misma, una porción mayoritaria del cerebelo y el istmo.

¿Cómo se organiza la información en la vesícula mesencefálica? La información reciente sobre la expresión de los genes en el tubo neural revela que en el polo caudal de la vesícula mesencefálica se produce una combinación muy particular. Hasta el momento tres genes aparecen expresados en forma de anillo transversal: *Wnt-1*, *Fgf-8* y *Gbx-2*. Junto a ellos, se manifiesta el dominio transversal de expresión de *En-2*, más extenso y distribuido en forma de gradiente. Vale decir, su concentración decrece homogéneamente hacia la región rostral.

Durante los últimos años nos hemos dedicado al estudio de los mecanismos morfogenéticos que estos genes regulan. Para nuestros experimentos nos servimos de embriones de pollo y codorniz; empleamos la técnica de trasplantación interespecífica, que consiste en intercambiar con microcirugía pequeños trozos del cerebro de los embriones. Demostramos la capacidad inductora del polo caudal de la vesícula mesencefálica en etapas precoces del desarrollo.

Mediante transplantes ectópicos, en el diencéfalo, de este mesencéfalo cau-

Estadios del desarrollo del cerebro. En la visión dorsal del polo anterior de la placa neural de un embrión de ratón de 7,5 días de gestación (arriba, izquierda), *con la expresión de algunos de los genes que influyen en el desarrollo de la vesícula mesencefálica* (barras de color), *se ilustran los territorios prospectivos del istmo-cerebelo* (verde) *y el mesencéfalo* (rojo) *dentro de la placa neural. Se esquematizan luego los tubos neurales, observados lateralmente, de embriones de ratón de 10,5 días de gestación; arriba, en el centro, los dominios de expresión de genes; a su derecha, la situación experimental tras la implantación de una bolita de Fgf-8* (púrpura) *en el diencéfalo, donde también se señala la inducción ectópica del patrón molecular de la región ístmica, y, abajo a la izquierda, los territorios prospectivos. Por último, se agrega un esquema de la posición del cerebelo istmo y mesencéfalo en un cerebro humano adulto* (abajo, derecha)

dal se observó una nueva expresión de genes que llevarán al tejido a diferenciarse en derivados mesencefálicos. Los transplantes ectópicos consisten en que la zona transplantada se inserta en una región diferente de su origen (por ejemplo, mesencéfalo en prosencéfalo). Se evidenció un efecto de inducción planar (inducción a través del epitelio neural) que partiendo desde el esbozo del cerebelo se proyectaba hacia adelante y formaba el esbozo del mesencéfalo rostral.

A la hora de seleccionar los posibles agentes inductores, descartamos tres proteínas, a saber: dos factores de transcripción cifrados por los genes *En-2* y *Ggx-2* y un producto de *Wnt-1*. Los factores de transcripción, en principio, no se secretan. El motivo de dejar fuera el gen *Wnt-1* obedecía a que se habían detectado casos de inducción sin expresión ectópica de dicho gen. Debíamos ensayar con un gen que se expresara en la zona de máxima actividad inductora en los transplantes y cifrara una proteína secretable y difusible. Ese gen era *Fgf-8*.

En colaboración con P. Crossley y G. Martin, de la Universidad de California en San Francisco, comenzamos en 1995 a estudiar el posible efecto del gen *Fgf-8* sobre la regionalización de la vesícula mesencefálica. Implantamos, en diferentes regiones del tubo neural, microbolitas que transportaban la proteína Fgf-8. Estas bolitas implantadas en el diencéfalo producían los mismos efectos que habíamos observado con los trasplantes embrionarios. La bolita promovía la expresión de los genes *Fgf-8*, *Wnt-1* y *En-2*, creando un patrón molecular similar al del polo caudal de la vesícula mesencefálica. Resultó un efecto morfogenético sorprendente: una transformación tisular con el desarrollo en el diencéfalo de estructuras ectópicas propias del neuroepitelio mesencefálico.

¿Existen barreras que se opongan a ese proceso de regionalización mediado por mecanismos de inducción planar? La implantación de microbolitas portadoras de la proteína Fgf-8 en los esbozos del diencéfalo y mesencéfalo nos está permitiendo conocer el alcance de este proceso de inducción planar.

En colaboración con el grupo de R. Gallego, del Instituto de Neurociencia de Alicante, demostramos ya en 1992 la presencia de una permeabilidad diferencial en las uniones de intervalo ("gap junctions") entre células de los segmentos y células de los límites intersegmentarios. Los resultados que estamos obteniendo ahora indican que los límites entre el mesencéfalo y diencéfalo, así como los existentes entre las regiones diencefálicas, muestran ciertas propiedades de barrera direccional al paso de la inducción producida por Fgf-8. Este fenómeno de permeabilidad selectiva direccional podría tener que ver con la composición de las proteínas en los canales de las uniones de intervalo.

Tenemos, pues, que un amplio segmento del tubo neural —la vesícula mesencefálica y la porción caudal de la prosencefálica— viene determinado por el efecto morfogenético de la proteína Fgf-8. El gen *Fgf-8* se activa, en una fase precoz, en el polo caudal de la vesícula mesencefálica, posiblemente por un fenómeno de inducción vertical realizado por el mesodermo subyacente; en el mesodermo se expresa antes el gen *Fgf-8*.

Por su parte, la proteína Fgf-8 regula la expresión de otros genes en el mesencéfalo, *Wnt-1* y *En-2*. Y hay que atribuir posiblemente al gradiente del gen *En-2* el desarrollo del cerebelo, máxima concentración y especificación consecutiva de los esbozos del istmo, mesencéfalo caudal y mesencéfalo rostral.

SALVADOR MARTÍNEZ
Depto. de Ciencias Morfológicas
Facultad de Medicina
Universidad de Murcia

Sarcoma de Kaposi

Formación del tumor

El sarcoma de Kaposi (SK) es un tumor de células del revestimiento de los vasos sanguíneos y linfáticos que llamamos endotelio. Suele ir frecuentemente asociado con la infección por virus de la inmunodeficiencia humana (VIH-1). Cierta proteína de este virus (la proteína TAT) y las citoquinas involucradas en los procesos inflamatorios promueven la proliferación de células del sarcoma, hasta que aparecen las lesiones clínicas producidas por dicha tumoración. El SK avanzado contiene células transformadas que se han liberado de su dependencia de factores de crecimiento y que inducen tumores en ratones.

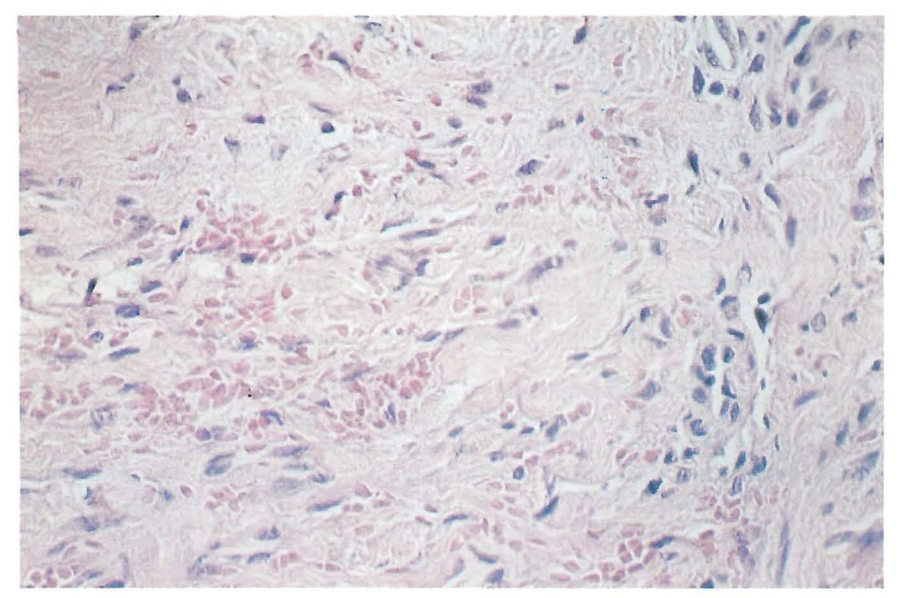
A raíz de la manifestación y propagación del síndrome de inmunodeficiencia adquirida (sida), se han multiplicado los diagnósticos de sarcoma de Kaposi epidémico. Se calcula que lo padecen un 20 % de varones homosexuales infectados con VIH-1. Hay cuatro manifestaciones epidemiológicas del sarcoma de Kaposi. El SK clásico tiene un curso clínico benigno y afecta a los varones adultos de origen mediterráneo. El SK endémico, más virulento, se da en niños y adultos negros, principalmente en Africa. El SK iacogénico se presenta en los receptores de trasplantes de órganos, tratados con drogas inmunodepresoras. El SK epidémico es la manifestación vinculada con la infección por VIH-1. Aunque puede aparecer en cualquier sexo y edad, suelen padecerlo los varones homosexuales.

El sarcoma de Kaposi acostumbra manifestarse en la piel a través de máculas rojas o pardas. Vistas al microscopio, las distintas clases de sarcoma guardan una estrecha semejanza y aparecen a la manera de una regeneración hística, con proliferación de células endoteliales y crecimiento de vasos sanguíneos (angiogénesis). En las lesiones advertimos las características células malignas en huso ("spindle cells"), un lumen vascular en hendidura, glóbulos rojos fuera del torrente y una matriz extracelular repleta de fibras reticulares y de colágeno. La presencia de macrófagos, linfocitos y células plasmáticas conforman un cuadro histológico propio de un proceso inflamatorio.

Según parece, las células en huso del sarcoma de Kaposi se originan en las células endoteliales de los vasos sanguíneos. En cultivos celulares, las citoquinas de la inflamación activan las células endoteliales normales. Tales cultivos adoptan una morfología retorcida y desempeñan una función que recuerda la de las células en huso del sarcoma.

Mediante citoquinas producidas por linfocitos activados, en el laboratorio de biología de células tumorales del norteamericano Instituto Nacional de la Salud se logró el crecimiento de una población de células de sarcoma de Kaposi dotadas de capacidad de proliferación. Comprobamos, en efecto, que el factor de necrosis tumoral, la interleucina-1, el interferón gamma y otras citoquinas producidas por linfocitos fomentan el crecimiento de las células en huso asociadas con sarcoma de Kaposi.

Estas citoquinas se encuentran en cantidades elevadas en el suero de las personas infectadas por VIH-1 y



Lesión cutánea de sarcoma de Kaposi. Se manifiesta en una coloración rojiza o parda, pues encierra una red microscópica de vasos sanguíneos y sangre subcutánea

en el interior de las lesiones de SK. Las citoquinas de la inflamación inducen la síntesis del factor básico de crecimiento de fibroblastos (FBCF), que opera como un factor autocrino y promueve el crecimiento de células endoteliales y, en consecuencia, de células del sarcoma.

Cuando se inoculan ratones desnudos con células de SK, se induce la formación de lesiones; estas alteraciones presentan células portadoras de cantidades elevadas del factor básico de crecimiento de fibroblastos. Los oligonucleótidos contra el ácido ribonucleico que cifra la proteína FBCF, así como los anticuerpos contra dicho factor, bloquean el crecimiento de células de sarcoma en cultivos celulares. La administración de estos factores en animales inhibe la formación de lesiones del SK. Por consiguiente, las citoquinas de la inflamación provocan lesiones de SK a través de la producción de FBCF.

Las células del sarcoma de Kaposi en sujetos sidosos producen otros factores angiogénicos, como el factor de crecimiento derivado de plaquetas y el factor de crecimiento endotelial, que ejercen funciones angiogénicas y mitogénicas, cuya acción es sinérgica con la del FBCF.

Las células infectadas por VIH-1 sintetizan la proteína vírica TAT, que estimula la proliferación de las células del sarcoma de Kaposi. Pese a que las células SK no se infectan con VIH-1, la proteína TAT de otras células puede ejercer las veces de factor de crecimiento. La proteína TAT induce la invasión de células del SK en el interior del tejido extracelular a través de la estimulación de la actividad migratoria y la expresión del gen que determina la enzima colagenasa IV. Se requieren ambas para que las células del sarcoma invadan las membranas basales y la matriz extracelular.

La razón de involucrar la proteína TAT en la transformación celular estriba en la observación de que los animales transgénicos para la proteína TAT inducen lesiones en la piel parecidas a las que genera el sarcoma. Ni en las células en huso de sarcoma ni en las células transformadas se encuentran el VIH-1 o el virus humano herpético 8 (HHV-8); sin embargo, estos u otros virus podrían promover las lesiones del sarcoma a través de la producción de citoquinas y el crecimiento de vasos sanguíneos.

En el ámbito de las lesiones de sarcoma nodular de Kaposi se han aislado líneas de células de SK transformadas que crecen independientemente de la acción de factores de crecimiento y que inducen tumores persistentes y metastásicos en ratones inmunodeficientes. Las células del SK transformadas, extraídas de una persona infectada por VIH-1 y de un receptor de transplante, tienen capacidad para originar tumores angiogénicos en ratones; las células presentan cromosomas anómalos, característicos de células transformadas.

Las investigaciones realizadas en tumores constituidos por células malignas del sarcoma de Kaposi demuestran la sensibilidad de las mismas a las manipulaciones hormonales. El suero de hembras de ratón preñadas manifiesta una actividad contra el sarcoma que se atribuye a una molécula parecida a la gonadotropina coriónica humana. Esta hormona parecida a la gonadotropina insta la regresión de tumores del SK en los animales y mata las células de cultivo, acelerando el proceso de apoptosis, o muerte celular programada. La sensibilidad de las células de sarcoma a las hormonas del embarazo constituye toda una novedad para los expertos, y cabe presumir una relación de la misma con la frecuencia baja del SK en mujeres que tienen niveles cíclicos de hormona estimulante del folículo y de hormona luteinizante. Estas primeras observaciones podrían apuntar hacia una forma nueva de control de la apoptosis por las hormonas.

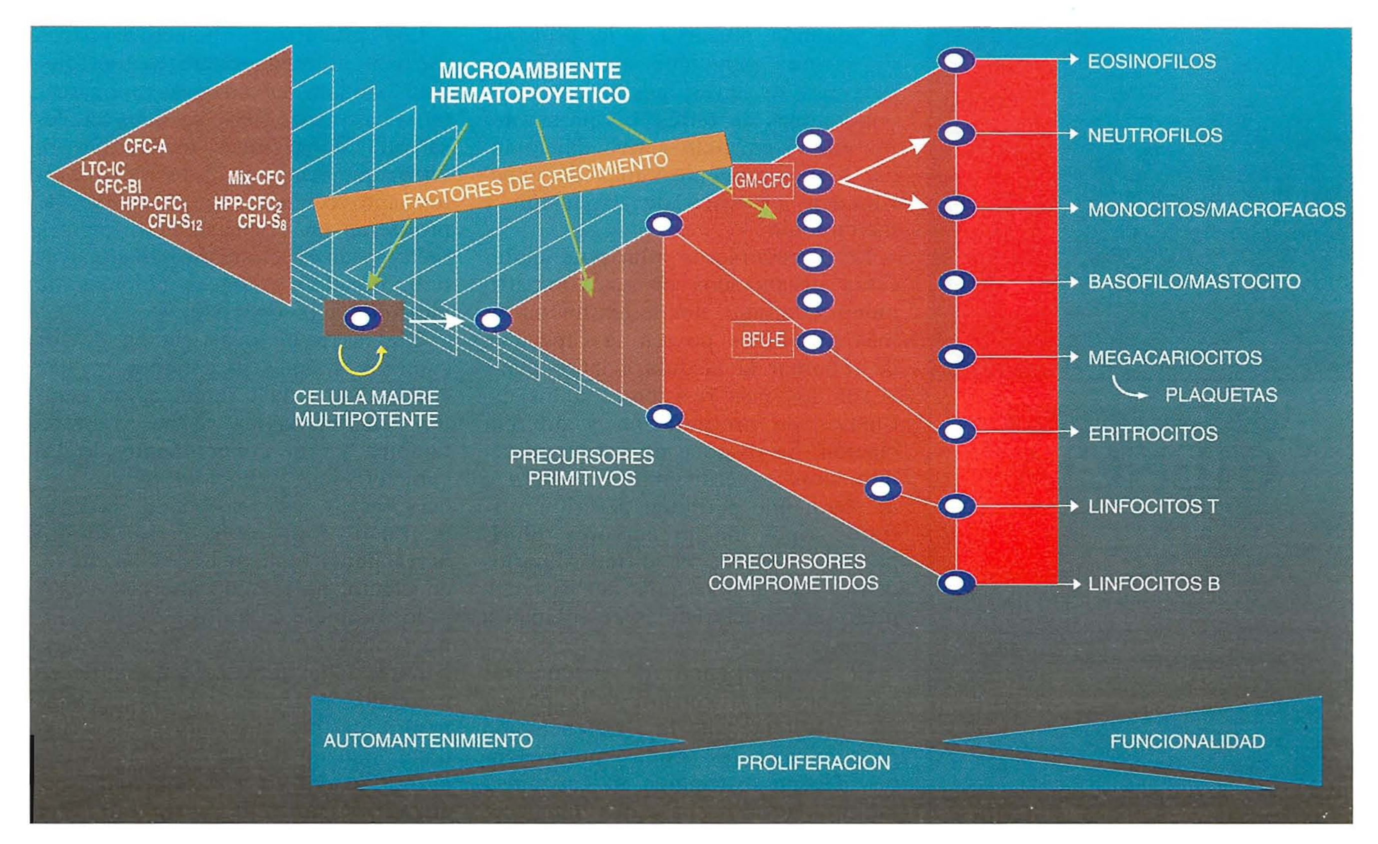
FELIPE SAMANIEGO
Y DAVID A. WHEELER
Instituto de Virología Humana
Universidad de Maryland, Baltimore

Sangre

Precursores hematopoyéticos

Las posibilidades que ofrece el trasplante de médula en pacientes con leucemia han permitido profundizar en las investigaciones relativas a la característica fundamental del sistema hematopoyético: su jerarquización. Este sistema tiene como función fundamental proveer de células maduras a la sangre del individuo durante toda su vida.

En último término, la producción de linajès linfoide y mieloide depende de un número pequeño de células madre ("stem cells"). Las células cepa, como se las conoce también, sufren procesos de proliferación y diferenciación que son los responsables de mantener la homeostasis celular. Es en la médula ósea de los mamíferos adultos donde se produce mayoritariamente la renovación celular del tejido hematopoyético, organizado jerárquicamente en tres compartimentos: el de células madre o de precursores primitivos, el de precursores comprometidos y el de células maduras. Los elementos celulares de los com-



Jerarquización celular del sistema hematopoyético. Se ilustran los componentes del compartimento de precursores primitivos definidos por ensayos in vivo *e* in vitro*: LTC-IC, célula iniciadora de cultivos a largo plazo. CFC-Bl, célula formadora de colonias con morfología blástica; CFC-A, célula formadora de colonias macroscópicas. CFC-Mix, célula formadora de colonias mixtas. CFU-S, célula formadora de colonias esplénicas (a los ocho y doce días) y HPP-CFC, célula con alto potencial proliferativo (1 inmadura 2 madura). En el compartimento de precursores comprometidos se han incluido a modo de ejemplo: GM-CFC, célula formadora de colonias granulomacrofágicas y BFU-E, unidad formadora de eritroides eclosivos*

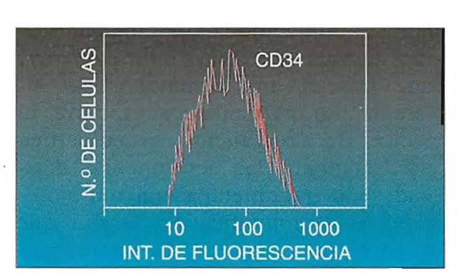
partimentos de precursores primitivos y comprometidos difieren del compartimento de células maduras en que sólo estas últimas son reconocibles morfológicamente.

El sistema hematopoyético se halla finamente regulado. Los niveles de células maduras se mantienen lo mismo en situaciones de reposo que en condiciones de estrés. Esta constancia se debe a la capacidad de los precursores para responder, en un microambiente competente, a factores de crecimiento hematopoyéticos específicos de cada linaje celular. Los factores actúan a veces de manera sinérgica y crean un entramado donde hay reguladores positivos y negativos, que aportan un ajuste preciso de los procesos de proliferación y diferenciación celulares.

Las primeras informaciones sobre la célula madre se obtuvieron trabajando con ratones. Ya en los años cincuenta se observó que los trasplantes de médula ósea en ratones letalmente irradiados posibilitaban su recuperación. Ese hallazgo aparecía vinculado a la detección de nódulos esplénicos. El análisis de distintos linajes celulares en tales nodulaciones confirmó que procedían de progenitores multipotenciales, a los que se denominó unidades formadoras de colonias en bazo.

En los años setenta, se logró dar una primera definición de la célula madre: entidad dotada de un amplio potencial de automantenimiento y de capacidad para diferenciarse en todos los linajes hematopoyéticos. Dos décadas más tarde, este criterio se ha ampliado y hoy se la designa como célula capaz de automantenerse, proliferar, producir una progenie diferenciada y funcional y poseer capacidad para reconstituir a largo plazo el sistema hematopoyético dañado tras una lesión.

La elevada capacidad de automantenimiento y la reducida tasa de proliferación son las propiedades que caracterizan al compartimento de precursores primitivos. Por la primera, se asegura la perpetuidad del sistema a lo largo de la vida del individuo;



HISTOGRAMA CITOMETRIA DE FLUJO



ENSAYO DE PRECURSORES IN VITRO

Técnicas habituales para la detección y cuantificación de precursores

la segunda preserva a la progenie de errores genéticos que pudieran derivarse de agresiones externas. En condiciones de estrés, los progenitores entran en ciclo activo dando lugar a una progenie capaz de experimentar procesos de expansión y maduración.

Los precursores pluripotenciales están organizados en un compartimento continuo, donde los miembros más primitivos poseen la capacidad de repoblar la médula a largo plazo y son los más resistentes a los estímulos de proliferación y diferenciación. Se dispone de varios procedimientos experimentales, *in vivo* e *in vitro*, que permiten describir distintos tipos de precursores pluripotentes, aunque es difícil situarlos dentro de la jerarquía del sistema, pues sus características se solapan a menudo.

El compartimento de precursores comprometidos constituye la progenie resultante de la diferenciación producida en las células multipotentes. Tienen restringida su capacidad multipotencial a una o dos líneas celulares, poseen poca o ninguna capacidad de automantenerse y presentan una alta tasa proliferativa, lo que explica su papel de población amplificadora como fase previa para la maduración terminal. A estas células clonogénicas, capaces de generar colonias de la misma estirpe celular, se las ha llamado "células formadoras de colonias" (CFC) y se les aplica un prefijo que denota el tipo celular al que dan lugar; por ejemplo, las CFC-G son las células que generan colonias de granulocitos. Mención especial merece la serie eritroide, que, en razón de las características morfológicas que distinguen a sus colonias, se le conoce por serie eclosiva ("burst series"); a la unidad formadora de eritroides eclosivos se la designa con las siglas BFU-E.

Las células precursoras responden a factores de crecimiento específicos. Gracias a las técnicas del ADN recombinante, muchas de estas moléculas han llegado al mercado; en hematología clínica, se emplean como terapia de apoyo en pacientes que poseen una hematopoyesis alterada. En particular, se recurre al factor de crecimiento granulocítico para combatir las neutropenias derivadas de tratamientos con quimioterapia o radioterapia. Se espera que el reciente clonaje del factor responsable de la producción de plaquetas posibilite su pronta comercialización y uso clínico.

Los precursores hematopoyéticos escapan al reconocimiento morfológico. Cuanto sabemos de sus características específicas se debe al desarrollo de técnicas de cultivo *in vitro*, que han permitido identificarlos aprovechando su capacidad de proliferar en respuesta a diferentes factores de crecimiento hematopoyético, creando entonces colonias de morfología reconocible.

Gracias a la investigación de los cambios físicos y antigénicos que acompañan a la diferenciación celular hematopoyética se ha avanzado también en el conocimiento de las características y funciones de los precursores. A este propósito, la citometría de flujo se ha convertido en herramienta fundamental. Constituye, en efecto, un método alternativo, rápido y objetivo, a los ensayos clonogénicos en medios semisólidos. Aunque todavía no se dispone de un marcador específico de las células madre, la determinación en el sistema humano del antígeno CD34 ha permitido definir una población que engloba a progenitores primitivos y comprometidos y es un índice representativo del poder regenerativo de la médula, información imprescindible en clínica oncológica.

Al hablar de los precursores hematopoyéticos, no podemos omitir dos fuentes alternativas a la médula ósea en la obtención de los mismos: sangre periférica y cordón umbilical. En ambas están cifradas grandes esperanzas, ya que su aplicación puede soslayar problemas derivados de ingreso hospitalario, infiltraciones medulares tumorales o enfermedad injerto contra huésped.

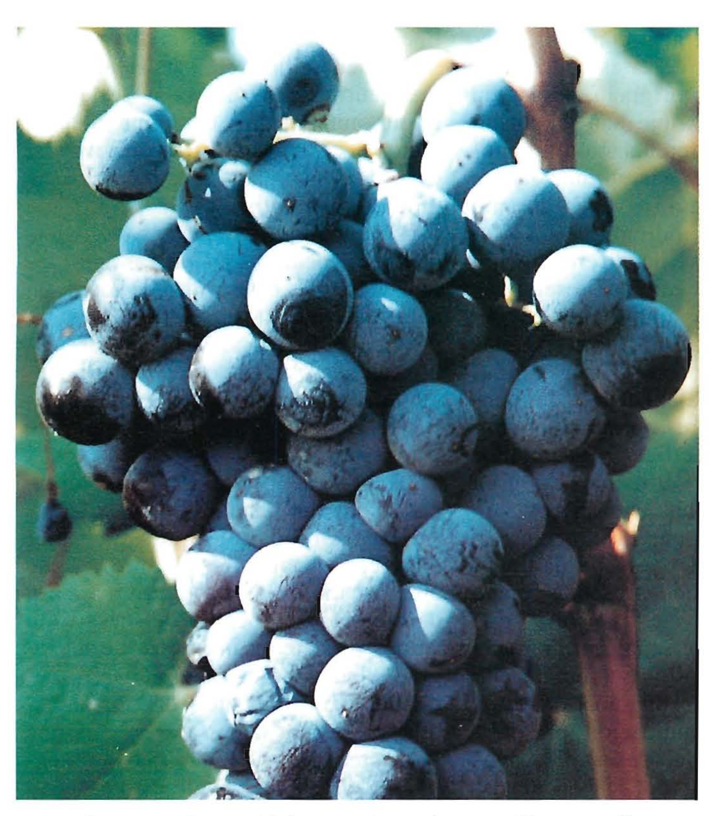
CONCEPCIÓN TEJERO
Facultad de Veterinaria,
Universidad Complutense, Madrid

Maduración de la uva

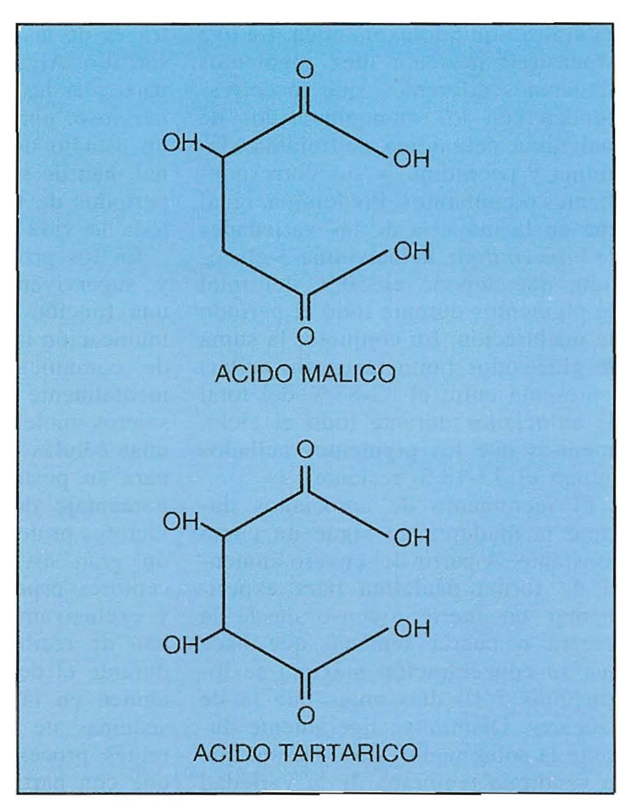
Factores físicos y químicos

En su maduración, los frutos experimentan una secuencia de cambios en color, sabor y textura que los hacen aceptables para el consumo. En el caso de la uva tales cambios se producen de una manera gradual.

La uva Monastrell es una variedad tinta de vinificación. Se caracteriza por sus bayas esféricas y de tamaño mediano, con pepitas pequeñas y alargadas y color externo



Aspecto de un típico racimo de uva Monastrell



Estructura de los ácidos mayoritarios del vino

negro-azulado. Los racimos nacen próximos al tronco, generalmente pequeños y muy compactos. Se trata de una variedad perfectamente adaptada a las condiciones de suelo y clima del sureste español. Aunque mayoritaria en la región de Murcia, se la cultiva también en la Rioja Baja y en Aragón.

El desarrollo del grano no ocurre de forma lineal. Presenta un doble carácter cíclico, en el que se distingue un período herbáceo y un período translúcido o de maduración. Propio del período herbáceo es la abundancia de clorofila en la piel o epicarpio, junto con un aumento notable de tamaño del fruto. Hacia el final de este período tiene lugar el envero, fase de desarrollo en la que cesa el crecimiento del grano, la clorofila se va degradando progresivamente y van apareciendo los antocianos, pigmentos rojo-azulados responsables de la coloración de las uvas tintas.

En el período translúcido se reanuda bruscamente el crecimiento del grano, si bien tras un rápido arranque decelera su ritmo a la vez que se va incrementando el contenido en azúcares. El aumento de volumen de las bayas coincide con el crecimiento de las vacuolas gracias a la aportación externa de sustancias nutritivas y agua y la acción de determinadas fitohormonas.

El crecimiento de las bayas de uva Monastrell es bastante rápido. Aumentan su peso desde el envero hasta la madurez en aproximadamente el 50 %. A la madurez de la uva le sigue una fase de sobremaduración, en la que intervienen de forma destacada factores físicos externos (calor y otros). En la fase de sobremaduración, la uva que permanece todavía en la planta experimenta una evaporación parcial del agua de la pulpa, que se traduce en una pérdida de peso en torno al 15 %, e incrementa la proporción de azúcares; de ahí que proporcione un menor rendimiento en jugo y una mayor riqueza en azúcares.

Los azúcares mayoritarios son glucosa y fructosa. Predomina la primera en el período herbáceo, cuando la uva está verde, para igualarse sus niveles durante el envero y ceder el paso a la fructosa hacia el final de la maduración.

Los ácidos más representativos de la uva son el ácido málico, muy extendido en el reino vegetal, y el ácido tartárico, característico de la vid. Con el aguacate, es la uva uno de los pocos frutos que contienen ácido tartárico en cantidades importantes. Aunque en menor proporción, el grano contiene ácido cítrico, succínico, fumárico, oxalacético y α-cetoglutárico.

El ácido tartárico, que predomina tanto en hojas como en bayas, desempeña un papel primordial en la calidad de los vinos. Es un ácido dicarboxílico relativamente fuerte y a él hemos de atribuirle el bajo *p*H del vino, en torno a 3, lo que es fundamental para su conservación. Por otra parte, junto al resto de los ácidos presentes, contribuye a compensar el sabor propio del alcohol. A este respecto, el vino, entre todas las bebidas fermentadas, es la más rica en alcohol y también la más ácida.

En las bayas en desarrollo hay un incremento progresivo de la acidez hasta poco antes de iniciar la maduración. A partir del envero la acidez total disminuye regularmente para reducirse en más de un tercio en el estado de madurez, caída que se atribuye a la combustión respiratoria, la dilución y la movilización de las bases que neutralizan los ácidos del fruto.

En las uvas tintas reviste particular interés el contenido en pigmentos, sobre todo los antocianos, cuya síntesis se inicia en el envero, para ir acumulándose conforme van madurando las bayas. La dinámica de la evolución de estos pigmentos durante la maduración depende de varios factores; por ejemplo, de las condiciones edafoclimáticas y las prácticas culturales. Sin embargo, su relación directa con la variedad posibilita el que sirva de criterio diferenciador de

naturaleza quimiotaxonómica. La uva Monastrell presenta diez pigmentos antocianos diferentes, que se corresponden con los monoglucósidos de malvidina, petunidina, delfinidina, cianidina y peonidina, y sus correspondientes p-cumaratos. Predomina, igual que en la mayoría de las variedades de *Vitis vinifera*, la malvidina-3-glucósido, que supone el 50 % del total de pigmentos durante todo el período de maduración. En conjunto, la suma de glucósidos (antocianos sin acilar) representa entre el 82-87 % del total de antocianos durante todo el ciclo, mientras que los pigmentos acilados suman el 13-18 % restante.

El incremento de antocianos durante la madurez no sigue un curso constante. A partir del envero aumenta de forma paulatina para experimentar un fuerte ascenso desde la tercera o cuarta semana, que hace que su concentración máxima se logre unos 7-10 días antes que la de azúcares. Disminuye ligeramente durante la sobremaduración. De ahí que la vendimia temprana de la variedad Monastrell produzca un vino de coloración intensa, bajo grado alcohólico y una acidez equilibrada.

José Antonio Fernández-López
E.T.S. de Ingenieros Agrónomos
de la Universidad de Murcia
Luis Almela
Facultad de Química
de la Universidad de Murcia
Juan Carreño
Centro de Investigación
y Desarrollo Agroalimentario
de la Región de Murcia

Comunicación intercelular

Función del factor neurotrófico derivado de la glía

El desarrollo de los seres vivos constituye uno de los procesos biológicos más complejos. Comienza a partir de una célula, que se divide en dos, éstas se subdividen a su vez, y así sucesivamente hasta dar lugar a todas las que configuran el organismo adulto. En los estadios iniciales tras la fecundación, todas las células son iguales, pero después se van diferenciando unas de otras y adquiriendo funciones específicas a través de las distintas etapas del desarrollo. Algunas de estas células, en particular las que originan el sistema nervioso, una vez que han adquirido un estadio de diferenciación funcional, han de sobrevivir durante largos períodos de tiempo, a veces durante toda la vida del individuo.

En los procesos de diferenciación y supervivencia celular desempeña una función muy importante la comunicación intercelular. Los sistemas de comunicación se basan fundamentalmente en la existencia de mensajeros moleculares, producidos por unas células específicas y secretados para su posterior difusión. Un gran porcentaje de tales mensajeros son factores proteicos que reconocen, con un gran nivel de selectividad, receptores específicos presentes única y exclusivamente en las células que han de recibir la señal programada durante el desarrollo. Se trabaja con ahínco en la investigación de estos sistemas de comunicación en diferentes procesos del desarrollo, aunque con particular énfasis en el sistema nervioso.

En todos los mamíferos, hombre incluido, el sistema nervioso consta de una amplia diversidad de neuronas conectadas entre sí con suma precisión. Intercaladas entre ellas se encuentran las células gliales, encargadas de ayudar a la formación y mantenimiento del entramado neuronal. Durante el desarrollo, cuando una célula "decide" convertirse en neurona, pierde su capacidad de división. Por ello, las neuronas que vamos perdiendo a lo largo de nuestra vida no pueden reemplazarse.

La mayoría de las neuronas que constituirán el sistema nervioso del individuo adulto se generan durante el desarrollo, tanto embrionario como postnatal. La información que poseemos sobre los mecanismos moleculares responsables de la organización y mantenimiento del sistema nervioso es muy limitada. El descubrimiento del factor de crecimiento nervioso (NGF) por Rita Levi Montalcini hace más de cuarenta años representó un hito para el estudio de estos procesos moleculares. Desde entonces, y de manera espectacular en los últimos años gracias al desarrollo de la biotecnología, se han descubierto un gran número de nuevos factores neurotróficos responsables de la diferenciación y mantenimiento de múltiples poblaciones neuronales.

Uno de estos factores neurotróficos de hallazgo reciente es el GDNF. Esta proteína se purificó a partir de una línea celular de origen glial (por ello se le denominó "*g*lial cell line-*d*erived *n*eurotrophic *f*actor") y se le describió inicialmente como un potente factor necesario para la supervivencia de ciertas neuronas dopaminérgicas y motoras en cultivo. A la pérdida de dichas neuronas se atribuyen enfermedades neurodegenerativas tan temibles como la enfermedad de Parkinson y la esclerosis lateral amiotrófica. La presencia de GDNF evita, o al menos atenúa, la inducción experimental de estas enfermedades en animales de laboratorio, un paso importante para su aplicación terapéutica.

La presencia del GDNF en órganos fuera del sistema nervioso sugirió la posibilidad de que este factor ejerciera una función pleiotrófica (de efectos múltiples) y participara en determinados procesos del desarrollo ajenos al sistema nervioso. Se ha logrado localizar el factor GDNF mediante la introducción de un marcador que torna azules las células que lo expresan, en estructuras rudimentarias de los sistemas digestivo y urogenital, indicio de que podría también intervenir en la fisiología de tales estructuras.

El estudio del papel que estos mensajeros de comunicación celular desempeñan en el desarrollo de los mamíferos se ha visto potenciado durante los últimos cinco años gracias a la disponibilidad de técnicas que permiten la manipulación del genoma, no ya sólo en células de cultivo, sino directamente en animales, en el ratón, por ejemplo. Estas técnicas de ingeniería genética nos capacitan para reemplazar cualquier gen o parte del genoma del ratón por secuencias diseñadas artificialmente. La "recombinación homóloga", así se llama el proceso, tiene lugar en determinadas células embrionarias que mantienen toda la información necesaria para generar un ratón cuando se implantan en hembras pseudopreñadas, es decir, hembras que han sido preparadas para recibir y desarrollar estos embriones genéticamente manipulados.

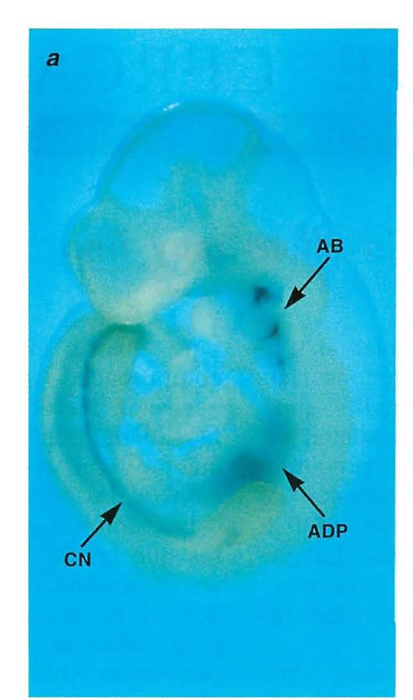
Aunque el método es aplicable, en principio, a todos los mamíferos, hasta el momento sólo se ha ensayado con éxito en ratones. Se ha utilizado para destruir genes cuya función se desea conocer (ratones "knock out"). La técnica en cuestión se basa en determinar la función del gen destruido (y por consiguiente de la proteína que produce), fundándose en la caracterización de las carencias del animal mutado, una premisa de amplio uso en individuos unicelulares.

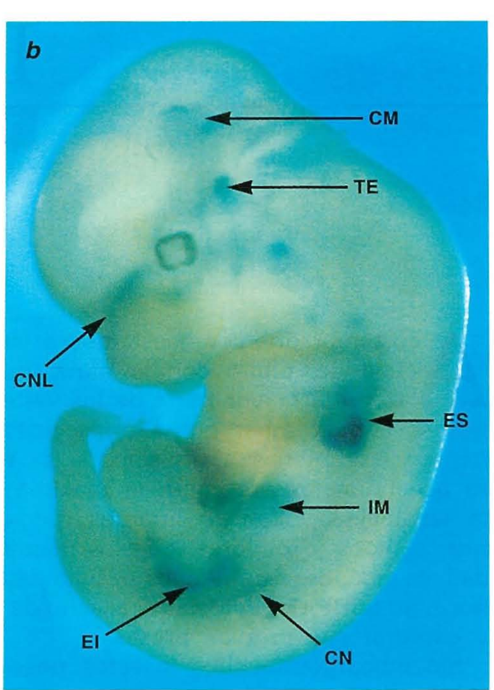
Dado el potencial del GDNF para el tratamiento de enfermedades neurodegenerativas, varios grupos de investigación han creado estirpes de ratón carentes del gen productor del GDNF con el fin de estudiar luego su función fisiológica en el desarrollo y mantenimiento del sistema nervioso. Para sorpresa de todos, se encontró que, en ausencia de GDNF, los ratones morían nada más nacer y, además, carecían de ambos riñones.

Los animales sometidos a manipulación genética presentaban, asimismo, graves alteraciones del sistema digestivo, como estenosis pilórica y dilatación del duodeno, debido a la total ausencia de neuronas entéricas. Este defecto en el sistema nervioso entérico es muy similar al observado en humanos que padecen la enfermedad de Hirschsprung, trastorno congénito caracterizado por la ausencia o disminución de los ganglios entéricos. La investigación genética ha revelado que un porcentaje pequeño de estos pacientes (1-2 %) sufren mutaciones en el gen productor del GDNF. En la mayoría de los casos (20-40 %), esta enfermedad se debe a mutaciones en su receptor, una glicoproteína de membrana denominada RET. Como cabría esperar, ratones sin receptores RET, también generados mediante manipulación genética, poseen defectos muy similares a los animales carentes de GDNF, lo mismo en cuanto al desarrollo que en cuanto a la supervivencia del sistema nervioso entérico.

Pero los ratones desprovistos de GDNF no presentan ninguna alteración en las neuronas dopaminérgicas, de lo que se desprende que el GDNF no es el principal factor responsable de la formación y supervivencia de esta clase de neuronas, a pesar de los resultados obtenidos en cultivos celulares. Cabe que GDNF resulte imprescindible para el funcionamiento de las neuronas dopaminérgicas en adultos, circunstancia que no ha sido posible examinar debido a la temprana edad en que mueren los ratones mutados. La ausencia de GDNF tampoco parece alterar otras poblaciones neuronales que responden a este factor neurotrófico en cultivos celulares, como son las neuronas noradrenérgicas. Sin embargo, estos ratones mutantes muestran un número reducido de ciertas poblaciones de neuronas motoras.

Mediante el análisis de ratones mutados en varios estadios de su desarrollo embrionario, ha podido determinarse la misión que el GDNF





Expresión del factor neurotrófico GDNF durante el desarrollo embrionario en ratones. La composición muestra embriones de (a) *nueve y* (b) *doce días de gestación derivados de una estirpe de ratón sometida a manipulación genética y en la que se ha sustituido una copia del gen productor del GDNF por un marcador de origen bacteriano que torna azules las células que expresan GDNF: AB, arcos branquiales; ADP, aparato digestivo primitivo; CM, cerebro medio; CN, cordón nefrogénico; CNL, conducto nasolacrimal; EI, extremidades inferiores; ES, extremidades superiores; IM, intestino medio; TE, tronco encefálico*

cumple en la formación del sistema renal. Es sabido que el desarrollo del riñón depende de una "señal inductiva" generada por las células mesenquimales del metanefro. Esta señal induce la formación del brote uretérico mediante una ramificación del conducto de Wolf. Tanto el metanefro como el conducto de Wolf son parte del cordón nefrogénico, una estructura embrionaria a partir de la cual se genera no sólo nuestro sistema renal, sino también las gónadas. Una vez que el brote uretérico penetra en la región mesenquimal del metanefro, sus células se diferencian y originan los túbulos renales. En ratones carentes de GDNF, el brote uretérico no se forma y, por tanto, tampoco se establece la comunicación necesaria entre el metanefro y el conducto de Wolf que ha de dar lugar a la aparición ulterior del riñón.

El análisis del cordón nefrogénico en embriones sometidos a manipulación genética ha revelado que el GDNF se expresa exclusivamente en las células mesenquimales del metanefro; de ello se infiere la probabilidad de que constituya la señal inductiva que inicia la formación del riñón. Esta hipótesis acaba de recibir un sólido respaldo tras determinarse que ratones carentes de RET, el receptor de GDNF, presentan el mismo defecto en el desarrollo del sistema renal. Como cabría esperar, el receptor RET también se expresa en el cordón nefrogénico; ahora bien, a diferencia del GDNF, lo hace en las células que forman el conducto de Wolf, es decir, en la estructura que recibe la señal inductiva enviada por el metanefro.

En resumen, estas recientes investigaciones no sólo han servido para poner de manifiesto el crítico papel del GDNF en el desarrollo del sistema nervioso entérico y de ciertas subpoblaciones de neuronas motoras, sino también para descifrar los mecanismos moleculares responsables de la génesis del sistema renal, uno de los órganos donde mejor se conocen los procesos de intercomunicación celular durante el desarrollo embrionario.

MARINA SÁNCHEZ
Centro de Biología Molecular "Severo Ochoa", Madrid

DE CERCA

Texto y fotos: Albert Masó

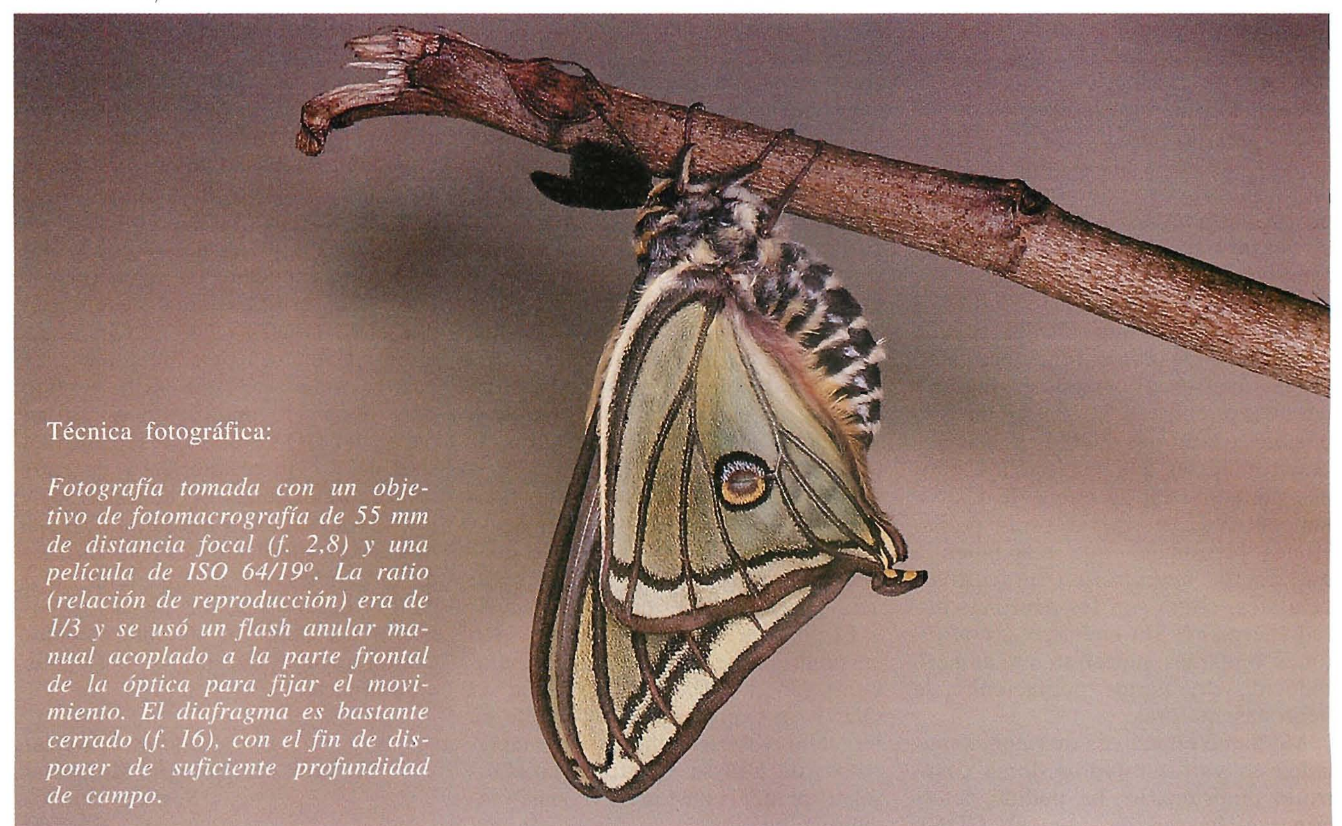
Un olfato muy fino

Acostumbrados como estamos a vincular el sentido del olfato con la nariz, lo que es cierto en la mayor parte de los vertebrados, quizá nos sorprenda saber que los insectos lo suelen tener en las antenas. Asimismo, si se nos preguntara qué animales presentan la máxima expresión de la sensibilidad olfativa, diríamos, pensando en felinos, cánidos y roedores, que los mamíferos. La verdad es que ese sentido les resulta vital para reconocer su territorio, detectar el acecho de depredadores y capturar sus propias presas.

Sin embargo, muchos insectos poseen una capacidad olfativa que nada tiene que envidiar a la de los mamíferos, si no la supera en muchos casos. De ella se valen para la búsqueda de alimento y, sobre todo, para escoger pareja y procrear. Por ejemplo, los lepidópteros machos recién nacidos (*primera fotografía*), en cuanto han extendido las alas, emprenderán el vuelo para detectar la feromona de las hembras. Se trata del satúrnido ibérico *Graellsia isabelae*, que vive en los pinares, especialmente de pino albar o silvestre (*Pinus sylvestris*). Según ha comprobado Josep Ylla, para emprender el vuelo necesitan incrementar su temperatura corporal hasta situarla por lo menos en 23 grados C. La adquieren con el movimiento de las antenas, vibración de las alas, temblor del cuerpo y locomoción.

Las antenas de las mariposas macho son mayores que las de las hembras, hasta el punto de que, en satúrnidos, lasiocámpidos, limántridos, notodóntidos y otros, este carácter se toma como criterio para distinguir el sexo. El macho las posee anchas, pectinadas y hasta plumosas, precisamente para cumplir la función explicada. En ellas residen los receptores, capaces de detectar la mínima cantidad de feromona, sustancia emitida por la hembra para atraer el otro sexo. La sensibilidad del olfato masculino es tal que reacciona ante una concentración de 1 mg en 100 km^3 de aire. Dicho de otra manera: las antenas detectan una concentración equivalente a la disolución de 100 litros de feromona en todos los océanos de la Tierra.

Aumento = 2,2 x



Técnica fotográfica:

Fotografía tomada con un objetivo de fotomacrografía de 55 mm de distancia focal (f. 2,8) y una película de ISO 64/19º. La ratio (relación de reproducción) era de 1/3 y se usó un flash anular manual acoplado a la parte frontal de la óptica para fijar el movimiento. El diafragma es bastante cerrado (f. 16), con el fin de disponer de suficiente profundidad de campo.

En ésta se utilizó el mismo objetivo (y emulsión) que en la fotografía anterior, pero con un tubo de extensión de 27,5 mm (el estándar de la óptica) intercalado entre el cuerpo de la cámara y el objetivo. Así se alcanza una ratio de R = 1, es decir, a tamaño real. Se usaron dos focos laterales oblicuos opuestos y un tercer punto de luz rasante por debajo del ejemplar para iluminar el fondo azul y eliminar las sombras. No hizo falta flash porque el insecto estaba disecado. Además, al ser plano y situarse completamente perpendicular, no se precisaba gran profundidad de campo, por lo que el diafragma se colocó a f. 5,6.

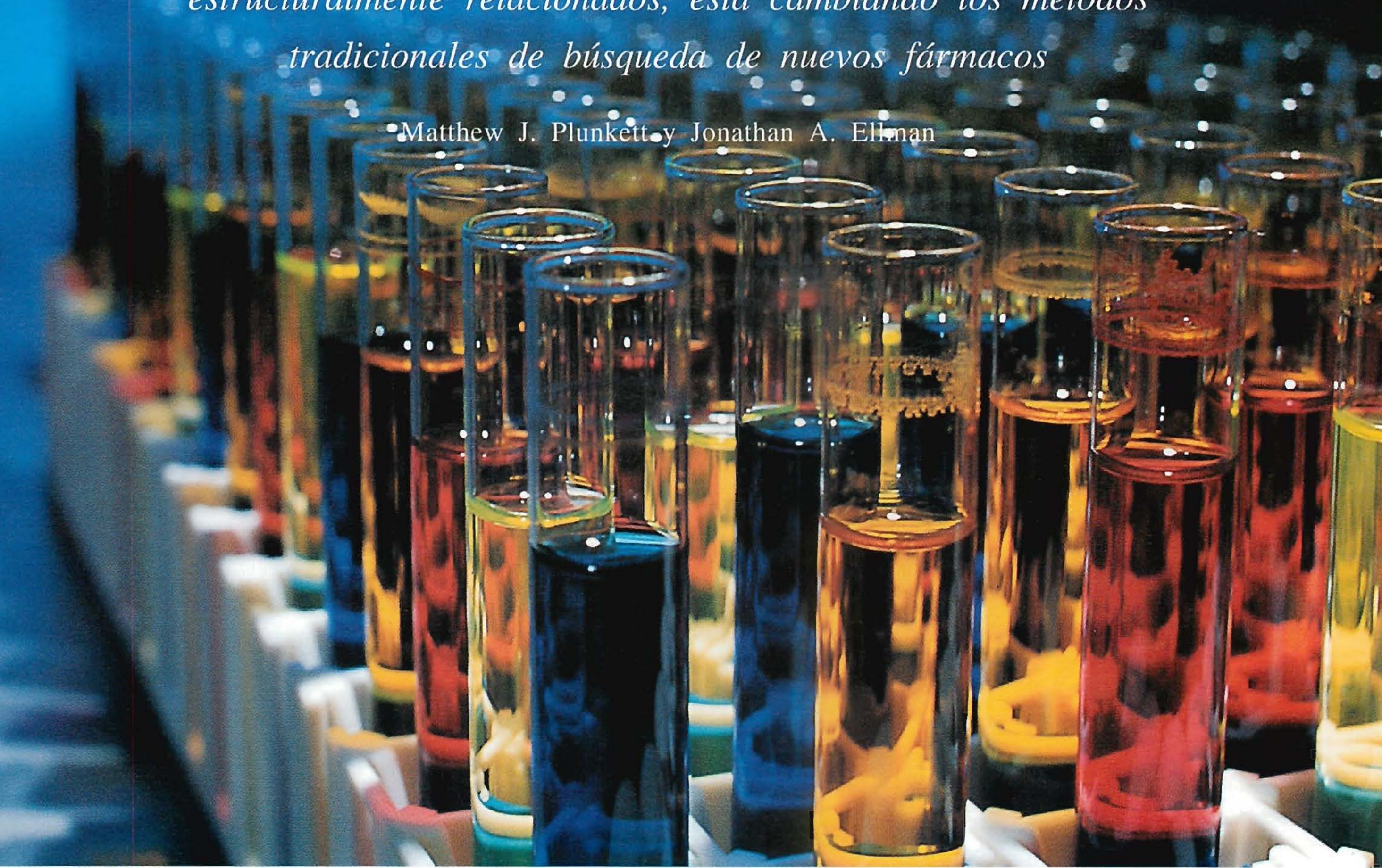
Aumento = 6,6 x



Química combinatoria y nuevos fármacos

Una técnica innovadora que genera un gran número de compuestos, estructuralmente relacionados, está cambiando los métodos tradicionales de búsqueda de nuevos fármacos

Matthew J. Plunkett y Jonathan A. Ellman



Para combatir la enfermedad, el sistema inmunitario genera anticuerpos, proteínas que se unen a los organismos invasores. Nuestro cuerpo puede construir alrededor de un billón de anticuerpos diferentes, combinando y recombinando sus partes constitutivas. Pero el sistema inmunitario no está preparado para diseñar un anticuerpo especial cada vez que se encuentra con un nuevo agente patógeno. Lo que hace es desplegar selectivamente, entre los disponibles, los anticuerpos que actuarán de una manera más eficaz contra un enemigo concreto. El sistema inmunitario trabaja así, en efecto, a través de una búsqueda global en su repertorio de anticuerpos, identificando los más idóneos y multiplicando su fabricación. En los últimos años, los autores, junto con otros químicos, se han aprestado a seguir el ejemplo de la naturaleza en el diseño de nuevos fármacos. Mediante química combinatoria, generamos un cuantioso repertorio de compuestos emparentados, que sometemos luego a ensayo para establecer los que podrían encerrar valor clínico.

Este procedimiento difiere del método habitual de que se valen los farmacólogos en su búsqueda de nuevos medicamentos. Estos acostumbran rastrear indicios de actividad clínica en los compuestos que tengan; por ejemplo, colecciones de productos de síntesis o productos químicos extraídos de bacterias, plantas u otras fuentes naturales. Una vez identificada una sustancia prometedora (denominada cabeza de serie), se van realizando trabajosas modificaciones secuenciales de la estructura, tras cada una de las cuales se ensaya cuál ha sido el efecto de las mismas sobre las propiedades químicas y biológicas del compuesto.

A menudo, tales procedimientos permiten obtener compuestos con una aceptable potencia y seguridad. Por cada nuevo medicamento que llega al mercado siguiendo este proceso, los investigadores manipulan, y desechan en el camino, miles de otros compuestos. El proceso es, en su conjunto, lento y caro: cuesta años y decenas de miles de millones de pesetas el pasar de una cabeza de serie en el laboratorio a un frasco con el

medicamento en la estantería de la farmacia del barrio.

El método clásico se ha refinado con la exploración de pruebas que operan de una forma más rápida y fiable que en el pasado; ha mejorado también con el conocimiento acerca de los efectos que las modificaciones estructurales ejercen sobre la actividad biológica. Sin embargo, conforme la ciencia médica ha ido avanzando, se ha incrementado la demanda de nuevos medicamentos para el tratamiento de enfermedades. Para encontrar esos fármacos, se necesitan muchos más compuestos con los que ensayar, así como un método para hallar nuevas cabezas de serie que requieran menores modificaciones.

El descubrimiento de la combinación correcta

La química combinatoria responde a esa necesidad. Permite generar rápidamente varios millones de moléculas que guardan parentesco estructural. Más aún, no se trata de moléculas cualesquiera, sino de aquellas que el químico, conocedor de las características de las sustancias de partida, espera que posean las propiedades deseadas. El estudio de los compuestos resultantes revela las variantes más potentes. De ese modo, la química combinatoria puede ofrecer fármacos potenciales, aptos para su ensayo clínico de una forma más rápida y a un coste impensable.

Para preparar colecciones combinatorias, o bibliotecas, de compuestos ensayables, los químicos no han de seguir caminos tortuosos. Parten de reacciones químicas conocidas, que permiten ensamblar conjuntos seleccionados de componentes básicos generando una amplia diversidad de estructuras mayores. Consideremos, por vía de ejemplo, cuatro moléculas: A1, A2, B1 y B2. Las moléculas A1 y A2 guardan una mutua relación estructural, y se supone que pertenecen a la misma clase de compuestos; B1 y B2 pertenecen a una segunda clase. Imaginemos que esas dos clases de compuestos pueden reaccionar para formar moléculas, alguna de cuyas variantes constituye, se sospecha, un potente fármaco. Las técnicas de la química combinatoria nos permiten construir fácilmente todas las posibles combinaciones: A1-B1, A1-B2, A2-B1 y A2-B2.

Ni que decir tiene que los laboratorios de investigación trabajan con un número mucho mayor de moléculas. Seleccionemos, por ejemplo, 30 compuestos, estructuralmente relacionados, que compartan un grupo amino ($-NH_2$). Escojamos, luego, un segundo conjunto de 30 que contengan todos un grupo carboxílico ($-CO_2H$). Entonces, bajo condiciones apropiadas, mezclaríamos y emparejaríamos cada amina con cada grupo carboxílico para formar nuevas moléculas, amidas ($-CONH-$). La reacción de cada una de las 30 aminas con cada uno de los 30 ácidos carboxílicos da un total de 30×30, o 900, combinaciones diferentes. Si añadiésemos un tercer conjunto de 30 nuevas moléculas, el número total de posibles estructuras sería de 27.000 ($30 \times 30 \times 30$). Y si usamos más de 30 moléculas cada vez, el número de posibles combinaciones aumentaría vertiginosamente.

Se dispone de dos técnicas combinatorias básicas. La primera, conocida por síntesis paralela, fue inventada a mediados de los años ochenta por H. Mario Geysen, hoy en Glaxo Wellcome. En principio, usó la síntesis paralela como un camino rápido para identificar cuál era el pequeño fragmento de una macroproteína que se unía a un anticuerpo. Geysen generó un repertorio amplio de péptidos (o fragmentos proteicos), mediante combinación de múltiples aminoácidos (los constituyentes básicos de los péptidos y de las proteínas) en diferentes permutaciones. Desarrollando docenas y, a veces, cientos de reacciones al mismo tiempo y comprobando si los péptidos resultantes se unían al anticuerpo de interés, halló en seguida los que eran activos de entre un amplio conjunto de posibles moléculas.

En una síntesis paralela, todos los productos se sitúan por separado en sus vasijas de reacción. Para desarrollar el procedimiento, los químicos usan una placa de microvaloración: una lámina de plástico moldeado que suele albergar ocho filas y 12 columnas de pequeños pocillos, cada uno de los cuales contiene unos cuantos mililitros del líquido en el que va a tener lugar la reacción. La disposición en filas y columnas permite organizar los componentes moleculares básicos que se quieren combinar y proporciona un medio rápido de identificar a un compuesto en un determinado pocillo.

Por ejemplo, si se quisiera producir una serie de amidas combinando 8 aminas diferentes y 12 ácidos carboxílicos, de acuerdo con las reacciones que antes hemos descrito, habría que

1. LA MEZCLA Y ENSAMBLAJE de los componentes moleculares básicos, de acuerdo con el proceder de la química combinatoria, permite crear, en brevísimo tiempo, un número altísimo de estructuras. Un robot (*arriba*) distribuye los reactivos químicos usados para ensamblar una extensa colección de compuestos (*página precedente*).

MATTHEW J. PLUNKETT y JONATHAN A. ELLMAN trabajaron juntos en la Universidad de California en Berkeley sobre técnicas combinatorias aplicadas a moléculas de interés farmacológico. Tras doctorarse en Berkeley en 1996, Plunkett ha recalado en la empresa Arris Pharmaceutical, donde participa en la creación de bibliotecas combinatorias para ensayos aleatorios e inhibición de proteasas. Ellman pertenece al claustro docente de Berkeley desde 1992. En su laboratorio se investiga el desarrollo de una nueva química para la síntesis de bibliotecas de compuestos orgánicos.

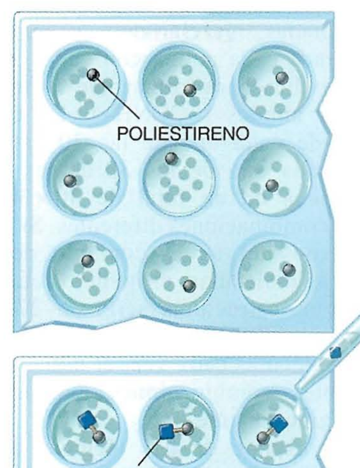
colocar una disolución que contuviera la primera amina en los pocillos situados a lo largo de la primera fila, la segunda amina en los de la segunda fila, y así sucesivamente. A continuación, se añadiría cada uno de los ácidos carboxílicos a los pocillos de manera secuencial, suministrando así una versión diferente para cada columna. A partir de sólo 20 componentes moleculares básicos, obtendríamos una biblioteca de 96 productos diferentes.

De ordinario, los químicos inician la síntesis combinatoria ensamblando el primer grupo de componentes moleculares básicos a unos abalorios de poliestireno inertes y microscópicos (el soporte sólido). Después de cada reacción, se va eliminando el material que no reaccionó, dejando sólo los productos deseados, que aún se encuentran fijados a las cuentas. Aunque las reacciones químicas necesarias para unir los compuestos a los abalorios y luego separarlos suponen complicar el proceso de síntesis, la facilidad de la purificación puede compensar tales inconvenientes.

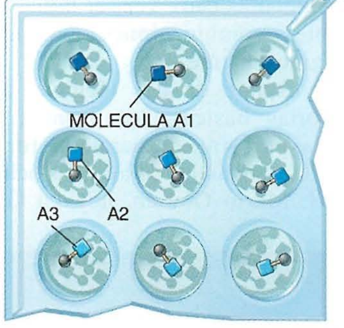
Muchos laboratorios cuentan ya con robots que se encargan de la parte rutinaria del proceso de síntesis paralela; por ejemplo, para distribuir pequeñas cantidades de moléculas de reactivo en los pocillos adecuados. Se logra así que el proceso resulte más exacto y menos tedioso. La empresa Parke-Davis construyó el primer sistema automático de síntesis paralela, un dispositivo robotizado capaz de generar 40 compuestos al mismo tiempo. Por su lado, los laboratorios Ontogen han desarrollado un robot capaz de generar hasta 1000 compuestos diarios. En general, el tiempo necesario para completar una síntesis paralela depende de cuántos compuestos se vayan a producir: cuando son miles, el doblar el número de productos supone casi duplicar el tiempo. Por esas razones de orden práctico, la síntesis paralela se limita a la producción de bibliotecas que contengan decenas de miles de compuestos a lo sumo.

Síntesis paralela

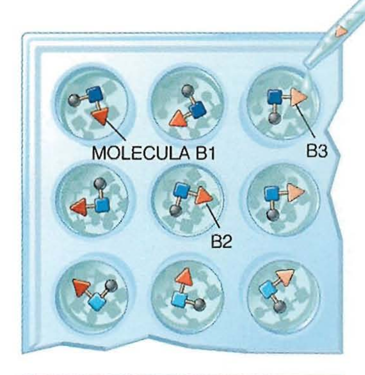
Paso 1
Se comienza con una lámina plástica en la que se han moldeado pocillos (placa de microvaloración), parcialmente rellenados con una solución que contiene abalorios de poliestireno inerte (*círculos grises*). Las placas de microvaloración constan de ocho filas y 12 columnas, para un total de 96 pocillos; este ejemplo muestra sólo la esquina superior izquierda de la placa.



Paso 2
Se añade el primer conjunto de moléculas —la clase A (*cuadrados*)— a los abalorios. Las moléculas A1 se colocan en los pocillos de la primera fila; las moléculas A2, en los pocillos de la segunda fila, y así sucesivamente. Una vez agregado un conjunto de moléculas, se filtra el material de cada pocillo para eliminar los reactivos químicos que no reaccionaron (los que no se unieron a los abalorios).



Paso 3
Se añade el segundo conjunto de moléculas —la clase B (*triángulos*)— en las columnas, con B1 en la primera columna, B2 en la segunda, etc. Se filtran los reactivos químicos que no reaccionaron, como en el paso 2.



Paso 4
Una vez producidos los 96 miembros de la biblioteca, se separan de los abalorios las estructuras finales. Los compuestos pueden someterse entonces a ensayo para determinar su actividad biológica.



Separar y mezclar

La segunda técnica para crear una biblioteca combinatoria se denomina síntesis de separación y mezcla. Fue introducida a comienzos de los ochenta por Arpád Furka, que trabaja ahora en la empresa Advanced Chem Tech de Louisville. A diferencia de la síntesis paralela, en la que cada compuesto permanece en su propio recipiente, la síntesis de separación y mezcla genera, en una misma vasija de reacción, la combinación de productos relacionados. Este método reduce substancialmente el número de recipientes que se requieren y eleva a millones el número de compuestos que pueden sintetizarse. La contrapartida, sin embargo, es que la detección de tamaña cifra de compuestos y la realización de los correspondientes ensayos biológicos resulta quizá bastante complicado.

Un ejemplo sencillo nos ayudará a entender el método. Supongamos que hay tres grupos de moléculas (A, B y C) y que cada grupo tiene tres miembros (A1, A2, A3; B1, B2, B3; y así sucesivamente). Dentro de un recipiente, unimos las moléculas de A1 a los abalorios de poliestireno; en un segundo recipiente, las molé-

culas de A2 y en un tercero las de A3. A continuación, colocamos todas la moléculas A unidas al abalorio en la vasija de reacción, las mezclamos bien y las distribuimos de nuevo en tres porciones iguales; cada vial alojará entonces una mezcla de los tres compuestos. Luego, agregamos las moléculas B1 al primer recipiente, las B2 al segundo, y las B3 al tercero. Una nueva ronda de adiciones para introducir las moléculas C genera un total de 27 compuestos diferentes.

Para aislar la estructura más potente, comenzaremos por ensayar las mezclas finales de productos y determinaremos la actividad media de cada lote. Apoyados en una batería de técnicas, podremos deducir qué combinación, dentro del lote más reactivo, presenta la actividad biológica buscada.

Algunos laboratorios farmacéuticos han automatizado también la técnica de separación y mezcla. Entre los primeros se halló Chiron. Sus químicos desarrollaron un sistema robótico capaz de construir millones de compuestos en unas semanas a través de este método. El robot distribuye los productos y lleva a cabo la mezcla y la partición del soporte sólido.

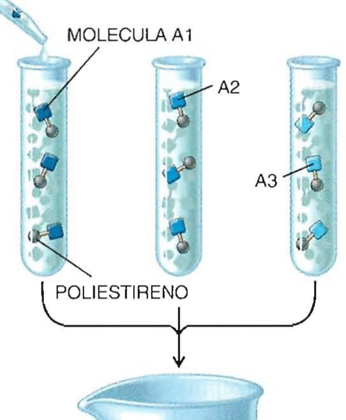
Como expusimos antes, uno de los problemas que plantea la síntesis de separación y mezcla es el de identificar la composición de un reactivo dentro de una mezcla tan grande. Debemos a Kit Lam, de la Universidad de Arizona, un procedimiento para superar el obstáculo. Observó que, al final de la síntesis de separación y mezcla, todas las moléculas unidas a un abalorio dado poseían la misma estructura. Los químicos podían separar de la mezcla las cuentas que contenían moléculas biológicamente activas y luego, usando técnicas de detección sensibles, establecer la naturaleza molecular del compuesto unido. Pero esta estrategia sólo funciona con determinados compuestos, como péptidos o pequeños segmentos de ADN.

Otros investigadores han desarrollado métodos para añadir a cada abalorio un marcador químico que pueda establecer el orden en el que los componentes moleculares básicos específicos se han unido a la estructura; en otras palabras, el producto químico equivalente a un código de barras UPC. Leyendo el conjunto de estos trazadores, tal es su nombre, en un abalorio dado, se obtiene una huella particular y, por tanto, la identidad del compuesto de ese abalorio. Con técnicas introducidas por W. Clark Still, de la Universidad de Columbia, la compañía Pharmacopeia, dedicada a la biotecnología, ha cosechado un sonado éxito aplicando potentes métodos de marcaje a sus bibliotecas combinatorias. No obstante, a causa de las dificultades que entraña la identificación de compuestos obtenidos por la técnica de separación y mezcla, los laboratorios farmacéuticos siguen apegados en su mayoría a la síntesis paralela.

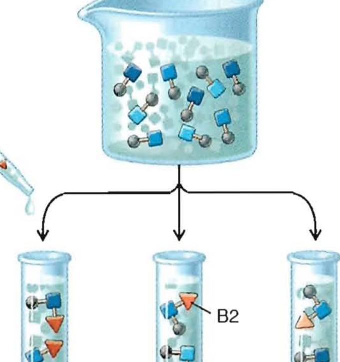
Bibliotecas de fármacos

Ambas técnicas de química combinatoria, la paralela y la de separación y mezcla, comenzaron siendo vías de obtención de péptidos. Pese a la importancia de estas moléculas en los sistemas biológicos, el interés farmacológico de los péptidos es limitado, pues se degradan en el intestino, no se absorben bien en el estómago y se eliminan prestamente del sistema circulatorio. La industria

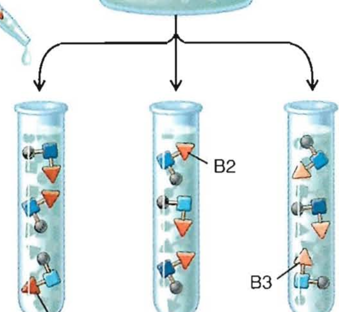
Síntesis de separación y mezclado



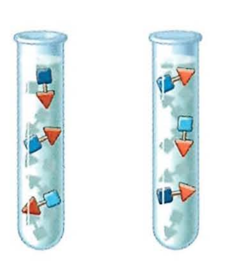
Paso 1
Se comienza con los tubos de ensayo que contienen abalorios de poliestireno inerte (*círculos grises*). Por mor de sencillez, el ejemplo muestra sólo tres recipientes, pero podrían usarse docenas. Se añade el primer conjunto de moléculas —la clase A (*cuadrados*)— a los tubos de ensayo, poniendo las moléculas A1 en el primer recipiente, las moléculas A2 en el segundo, y así sucesivamente.



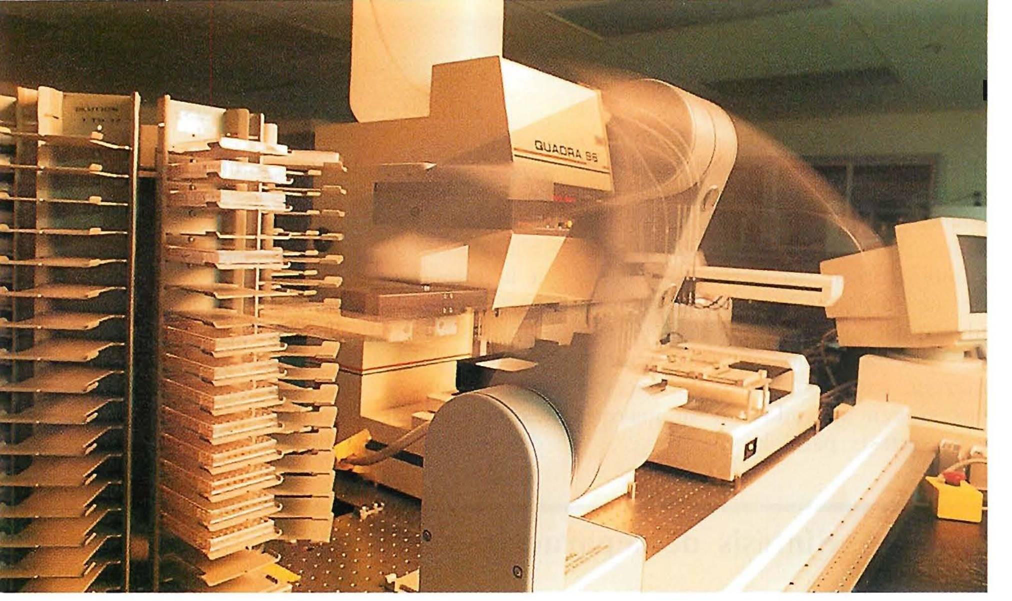
Paso 2
Se mezclan los contenidos de todos los tubos de ensayo.



Paso 3
Se divide la mezcla en porciones equivalentes. Luego, se agrega el segundo conjunto de moléculas —la clase B (*triángulos*)—, depositando las moléculas B1 en el primer tubo, B2 en el segundo, etc. (Se repiten los pasos 2 y 3 las veces que sean necesarias, en función del número de conjuntos de componentes básicos que vayan a añadirse.)



Paso 4
Los abalorios se separan de cualquier reactivo químico que no haya reaccionado. Se desprenden las estructuras finales. Hay que analizar también los contenidos de cada tubo de ensayo al objeto de determinar la actividad biológica promedio de la mezcla. Ya que cada mezcla contiene el mismo componente final, podemos determinar cuál variante es la mejor; imaginemos que la B2 puede ser la más potente. Hay que repetir la síntesis, añadiendo sólo B2 a los compuestos A para encontrar qué combinaciones A-B2 presentan mayor actividad biológica.



2. El ROBOT DE ENSAYOS de Arris Pharmaceutical transfiere automáticamente las placas de microvaloración que contienen las bibliotecas combinatorias al equipo que realiza los ensayos de actividad biológica.

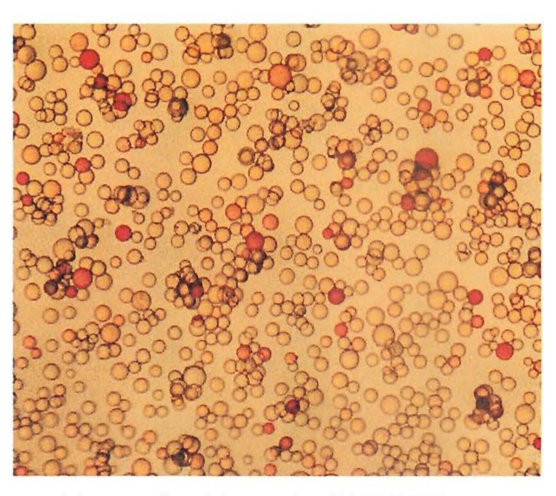
farmacéutica comenzó a utilizar los métodos combinatorios con mayor ahínco en cuanto vio que podía aplicarse a compuestos farmacológicamente activos; verbigracia, las benzodiazepinas.

Las benzodiazepinas se cuentan entre los medicamentos que se recetan con mayor frecuencia. Si bien el diazepam, o Valium, es el representante más popular, lo cierto es que el grupo incluye derivados con importante actividad biológica: agentes anticonvulsivos y antihipnóticos, antagonistas del factor de activación plaquetaria (una sustancia importante en la coagulación de la sangre), inhibidores de la enzima transcriptasa inversa del VIH e inhibidores de la Ras farnesil transferasa (enzima implicada en el cáncer). Ante un espectro de actividad tan amplio, resultó obvio que las benzodiazepinas reclamaran de inmediato la atención para someterlas a síntesis combinatoria en la búsqueda de nuevos fármacos. En 1992, uno de nosotros (Ellman), en colaboración con Barry Bunin, de la Universidad de California en Berkeley, describió una vía de síntesis de benzodiazepinas sobre un soporte sólido, que hizo posible la construcción de bibliotecas que contienen miles de derivados benzodiazepínicos.

Más recientemente, los autores de este artículo hemos pergeñado un método mejor para fabricar benzodiazepinas sobre un soporte sólido; nuestra nueva síntesis facilitó el acceso a un número mucho mayor de compuestos. El reto principal al que debe hacer frente cualquier síntesis combinatoria es la determinación de las condiciones experimentales que minimicen los efectos colaterales que generan impurezas. Invertimos más de un año ajustando las condiciones de reacción de nuestra nueva síntesis de benzodiazepinas. Pero, una vez establecimos el procedimiento óptimo, obtuvimos, con la colaboración de Bunin, 11.200 compuestos en dos meses por vía de síntesis paralela.

Cabezas de serie prometedoras

A partir de nuestras bibliotecas de benzodiazepinas, hemos identificado varios compuestos con actividad biológica prometedora. En un proyecto con Victor Levin y Raymond Budde, de la Universidad de Texas en Houston, hemos identificado un derivado benzodiazepínico que inhibe una enzima implicada en el cáncer de colon y la osteoporosis. Y en colaboración con el grupo de Gary Glick, de la Universidad de Michigan, descubrimos otra benzodiazepina que bloquea la interacción entre anticuerpos y cadenas simples de ADN; proceso éste que podría hallarse involucrado en el lupus eritematoso sistémico. Dichos compuestos se encuentran, sin embargo, en fases todavía muy precoces de pruebas de laboratorio.



3. LOS ABALORIOS DE POLIESTIRENO (aumentados unas 100 veces) se emplean en química combinatoria con el fin de separar los productos que no han logrado unirse a las cuentas, y no han reaccionado pues. Los abalorios que resultaron positivos en un ensayo de búsqueda de receptores artificiales de esteroides aparecen en rojo.

Tras demostrarse que la química combinatoria podía aplicarse a la fabricación de medicamentos, la industria farmacéutica se entregó a nuevos proyectos. En el último lustro, se han fundado docenas de pequeñas compañías dedicadas por entero a la química combinatoria. La mayoría de las grandes firmas poseen ahora sus propios departamentos de química combinatoria o han alcanzado un acuerdo con otras pequeñas especializadas en ese dominio.

De acuerdo con lo que cabría esperar, la aplicación de técnicas combinatorias ha trascendido ya el campo de las benzodiazepinas. Abarca ahora un amplio grupo de nuevos materiales. En general, los químicos emplean las bibliotecas combinatorias de pequeñas moléculas orgánicas como fuentes de nuevas cabezas de serie prometedoras o para optimizar la actividad de una cabeza de serie ya conocida. Cuando se busca una nueva estructura, hay que crear extensas bibliotecas, con decenas de miles e incluso millones de productos finales. Por contra, el fondo de una biblioteca diseñada para mejorar la potencia y seguridad de un compuesto conocido es mucho menor, de sólo unos centenares de sustancias.

Varias compañías farmacéuticas están acometiendo ensayos clínicos humanos con fármacos candidatos que la química combinatoria descubrió. Por tratarse de programas bastante novedosos, ningún candidato ha pasado aún todas las pruebas exigidas por el ente adminitrativo norteamericano que autoriza la comercialización de nuevos fármacos. Pero es sólo cuestión de tiempo el que un medicamento

desarrollado a través de la química combinatoria llegue al mercado.

Pfizer tiene en tramitación un expediente. Siguiendo métodos normalizados, la compañía descubrió en 1993 una cabeza de serie con potencial capacidad preventiva de la ateroesclerosis o endurecimiento de las arterias. En menos de un año, usando síntesis paralela, Pfizer obtuvo un conjunto de 1000 derivados de la estructura original, alguno de los cuales centuplicaba la potencia de la cabeza de serie. Un fármaco derivado de esta serie se halla en fase de ensayo clínico en humanos. Vale la pena destacar que su equipo de investigación creó más de 900 moléculas antes de dar con un progreso en su actividad biológica. Pocos laboratorios, limitados a los trabajos rutinarios de modificaciones secuenciales de una cabeza de serie, podrían disponer del tiempo y la inversión necesarios para obtener casi 1000 derivados que no mostrasen ventaja respecto a la sustancia original.

Los químicos de Eli Lilly recurrieron también a la síntesis paralela para elaborar un compuesto, ahora ya en fase de ensayo clínico, para el tratamiento de la migraña. Descubrieron una primera sustancia que se unía de manera efectiva al blanco específico o receptor. Pero la cabeza de serie mostraba, asimismo, una afinidad alta por otros receptores parecidos, comportamiento que puede producir efectos secundarios rechazables. Los investigadores de la compañía emplearon la síntesis paralela para fabricar unos 500 derivados del compuesto antes de llegar al que actualmente está sujeto a evaluación.

La ciencia, en su avance, habrá de encontrar vías para formar bibliotecas combinatorias en un tiempo incluso menor y a menos coste. Ya se están desarrollando métodos de reacción inteligentes que aumentarán el rendimiento final de los productos o eliminarán la necesidad de añadir y luego quitar los abalorios de poliestireno. El futuro también verá cambios en la extracción y análisis de la información sobre la actividad de los productos ensayados. Por ejemplo, los datos relativos al modo en que miles de compuestos de una biblioteca combinatoria se unen a determinado receptor pueden aprovecharse para predecir la forma, el tamaño y la carga electrónica del receptor, aun cuando se desconozca la estructura exacta de éste. Con esa información los químicos pueden orientarse a la hora de modificar cabezas de serie existentes o en su tarea de seleccionar productos de partida para construir nuevas bibliotecas combinatorias.

Aunque nos hemos ceñido al descubrimiento de nuevos fármacos, el poder de la química combinatoria se deja sentir también en otros campos. Por ejemplo, en el de la ciencia de los materiales. El grupo de Peter G. Schultz, de la Universidad de California en Berkeley, se ha apoyado en métodos combinatorios para identificar superconductores de alta temperatura. Otros investigadores han aplicado las técnicas combinatorias para fabricar cristales líquidos de pantallas planas y materiales para la construcción de baterías de capa fina. Quienes laboran en estos proyectos esperan producir nuevos materiales de manera rápida y barata. Evidentemente, el potencial encerrado en tan vigorosa herramienta apenas si ha empezado a entreverse.

A más de uno le parecerá que la química combinatoria se mueve en el terreno de lo aleatorio: da la impresión de que combinar varios componentes moleculares básicos y esperar que algo útil salga de la mezcla supone el triunfo del azar sobre el conocimiento y la predicción cuidadosa. Nada más distante de la verdad. Una buena biblioteca es el resultado de un desarrollo y planificación tenaces. Los químicos deben decidir qué componentes moleculares básicos combinar y determinar cómo someter a prueba la actividad biológica de las estructuras resultantes. La química combinatoria permite reunir, organizar y analizar gran número de datos en un amplio repertorio de caminos inéditos y apasionantes. El principio de la selección más eficaz de compuestos de un conjunto de ellos relacionados entre sí —el principio de funcionamiento del sistema inmunitario— está cambiando el proceder de los químicos en su búsqueda de nuevos medicamentos. Es una agradable ironía que esta lección aprendida de nuestras defensas naturales pueda servirnos cuando tales defensas se desmoronan.

4. CREACION de superconductores mediante química combinatoria. Esta biblioteca de 128 compuestos de óxido de cobre (CuO) produjo varias láminas superconductoras.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SYNTHESIS AND APPLICATIONS OF SMALL MOLECULE LIBRARIES. Lorin A. Thompson y Jonathan A. Ellman en *Chemical Reviews*. vol. 96, n.º 1, páginas 555-600; enero, 1996.

COMBINATORIAL CHEMISTRY. Número especial de *Chemical & Engineering News*, vol. 74, n.º 7, páginas 28-73; 12 de febrero, 1996.

COMBINATORIAL CHEMISTRY. Número extraordinario de *Account of Chemical Research*. Dirigido por Anthony W. Czarnik y Johathan A. Ellman, vol. 29, n.º 3, págs. 28-73; marzo, 1996.

HIGH-THROUGHPUT SCREENING FOR DRUG DISCOVERY. James R. Broach y Jeremy Thorner en *Nature*, volumen 384, suplemento n.º 6604, págs. 14-16; 7 de noviembre, 1996.

La erosión, constructora de montañas

Entenderemos mejor la historia de la Tierra si conocemos la forma en que la interacción entre las fuerzas tectónicas, erosivas y climáticas modela las montañas

Nicholas Pinter y Mark T. Brandon

Las montañas ocupan un volumen mayor que todas las estructuras de construcción humana juntas. Además, están esculpidas con un detalle que no iguala un palacio barroco. El pináculo del mundo —la cima del Everest— alcanza los 8848 metros, unas 15 veces más que el más alto de los edificios levantados por mano humana. No debe, pues, sorprendernos que una topografía tan espectacular haya infundido temor e inspirado a artistas y aventureros a lo largo de la historia.

Las recientes investigaciones han conducido a un enfoque nuevo sobre la génesis del relieve más imponente del planeta. Las montañas se crean y modelan, tal parece, no sólo por los movimientos de las grandes placas tectónicas que constituyen el exterior de la Tierra, sino también por el clima y la erosión. En particular, las interacciones entre procesos tectónicos, climáticos y erosivos ejercen una influencia sobre la forma y la altitud máxima de las montañas, así como sobre la cantidad de tiempo necesario para construir —o destruir— una cordillera. Paradójicamente, el modelado de las montañas parece depender tanto de las fuerzas destructivas de la erosión cuanto del poder constructivo de la tectónica. Tras un siglo de considerar la erosión como la hermana débil de la tectónica, muchos geólogos opinan ahora que la erosión ha de ocupar el rango de cabeza de familia. En palabras de un grupo de investigadores: "Saboreamos la ironía de que las montañas deban su [musculatura] al tintineo de minúsculas gotas de lluvia."

Debido a la importancia de la formación de las montañas en la evolución de la Tierra, estos hallazgos tienen consecuencias significativas para las ciencias de la Tierra. Para un geólogo, las llanuras, los cañones y, sobre todo, las montañas revelan, a grandes rasgos, el desarrollo de la Tierra a lo largo de cientos de millones de años. En esta confusa historia, las montañas nos indican dónde han tenido lugar los acontecimientos corticales o subcorticales, como las colisiones de las placas tectónicas, que han levantado esta superficie. De ese modo, las montañas son la manifestación más visible de las potentes fuerzas tectónicas en acción y de los dilatados lapsos de tiempo en que han operado.

Este modelo reciente emerge tras una larga historia. Uno de los primeros modelos globalizadores sobre la evolución de las montañas en el transcurso del tiempo fue el del ciclo geográfico, publicado en 1899. Este modelo proponía un hipotético ciclo vital de las cadenas montañosas, desde un nacimiento violento provocado por un espasmo, breve y fortísimo, de levantamiento tectónico hasta el paso gradual hacia la senectud causado por una erosión lenta, aunque persistente. La belleza y la lógica del ciclo geográfico determinó que, durante casi un siglo, los geólogos pasaran por alto sus abrumadoras limitaciones.

En los años sesenta de nuestro siglo, la revolución de la tectónica de placas atribuyó la formación de las montañas a los movimientos horizontales de grandes bloques de litosfera, o la parte exterior de la tierra bastante fría y quebradiza. En este cuadro general, la energía calorífica interna modela la superficie del planeta mediante compresión, calentamiento y rotura de la litosfera, cuyo grosor varía de 100 kilómetros o menos bajo los océanos a 200 o más bajo los continentes. La litosfera no es un caparazón compacto, sino que está subdividida en docenas de placas propulsadas por calor subyacente. Estas placas se mueven unas respecto a las otras, movimiento que explica la mayoría de las características y los fenómenos de nuestro mundo con los que estamos familiarizados, como los terremotos, los fondos oceánicos y las montañas.

Los geólogos no han dejado, ni mucho menos, de reconocer en la tectónica de placas una fuerza formadora de montañas. Sin embargo, en las dos últimas décadas, han llegado a la conclusión según la cual las montañas se explican mejor, no como el resultado de la tectónica sola, sino como el producto de un sistema que combina procesos de erosión y climáticos junto con los tectónicos y que supone complejas relaciones y retroalimentaciones entre esos tres componentes.

La tectónica de placas provee todavía el marco básico que da cuenta de la distribución de las montañas en la superficie terrestre. Se sigue explicando la formación de las montañas por el aumento de masa, calor o combinación de ambos en una zona de la corteza terrestre (la corteza es la parte superior de la litosfera). Una corteza más gruesa o a mayor temperatura asciende y crea montañas, puesto que la corteza se halla esencialmente flotando sobre el manto subyacente; la corteza más gruesa o más caliente (menos densa) flota más. La tectónica de placas contribuye al aumento de grosor de la corteza tanto por convergencia lateral entre placas adyacentes como por la ascensión de calor y magma (roca fundida).

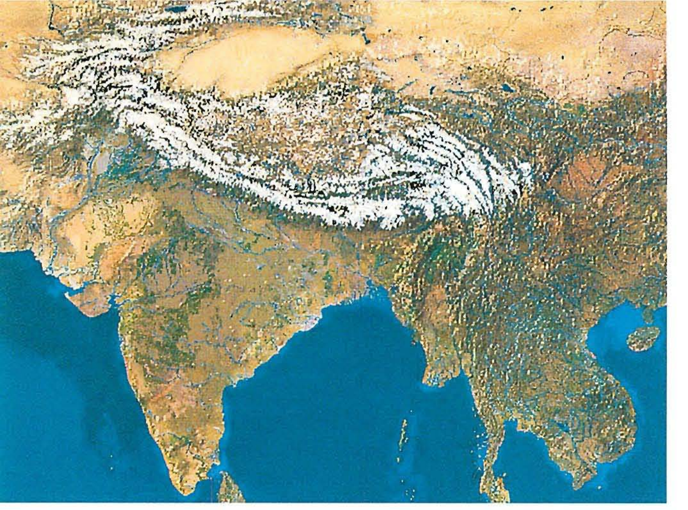
Subducción o colisión

La convergencia de placas se produce de dos maneras. Una placa desciende, se subduce, bajo otra de camino hacia el manto. En el límite de la zona de subducción, la placa superior se engruesa en virtud de la compresión sufrida y de la adición de magma procedente de la fusión de la placa descendente. Por subducción se han formado muchas montañas, incluidas la mayoría de las cordilleras que bordean el océano Pacífico en la zona geológicamente activa que conocemos por cinturón de fuego. En la colisión continental, por contra, ninguna placa se subduce en el manto, y así toda la masa agregada en razón de la colisión contribuye a la formación de montañas. Estas colisiones han creado algunas topografías espectaculares; citaremos, a este respecto, la meseta del Tíbet y el Himalaya, que incluye los 10 picos más altos del mundo.

El flujo de magma y calor hacia la corteza terrestre, por ejemplo, durante la actividad volcánica, puede regir también la formación de montañas. Las cadenas montañosas más largas de la Tierra —las dorsales oceánicas— son el resultado del magma que asciende conforme van alejándose las placas adyacentes, formando nueva corteza bajo el océano. Estas dorsales discurren por los océanos Atlántico, Pacífico oriental e Indico al modo como lo hace la costura de una pelota de béisbol. La dorsal mesoatlántica, que se extiende a lo largo de más de 15.000 kilómetros, se eleva hasta 4000 metros sobre las llanuras abisales circundantes. Por otro lado, en los continentes el calor asociado con el flujo de magma favorece, asimismo, la elevación de grandes áreas disminuyendo la densidad de la corteza y aumentando su capacidad de flotar sobre el manto subyacente.

El enfoque sistémico sobre la formación de las montañas que empieza a configurarse añade a esos fenómenos tectónicos los efectos de la erosión y el clima, a menudo estrechamente entrelazados. En la noción de erosión se incluye la disgregación de la roca, los desprendimientos de las

1. VALLE ESPECTACULAR de las Montañas Rocosas canadienses, esculpido por los glaciares —potente fuerza erosiva— durante la última glaciación.



2. EL HIMALAYA y la meseta del Tíbet, definidos con toda nitidez en esta imagen de satélite: zona en blanco situada al norte y al este de la India. La cordillera que se extiende a lo largo del límite sur es el Himalaya, fantástica manifestación de la colisión, que aún hoy prosigue, iniciada hace 50 millones de años, cuando la placa tectónica de la India empezó a incrustarse en la asiática.

vertientes y el transporte de sedimentos por los ríos. La combinación de agentes de erosión activos sobre un paisaje concreto —gravedad, agua, viento y hielo glacial— depende del clima local, de lo abrupto de la topografía y de los tipos de roca que se encuentran en la superficie o cerca de ella.

El clima se halla inextricablemente vinculado a la erosión, pues aquél afecta a la tasa media de pérdida de material en un paisaje. En general, las condiciones más húmedas favorecen tasas de erosión más rápidas; sin embargo, una mayor humedad contribuye al crecimiento de la vegetación, que, asimismo, ayuda a "blindar" la superficie. Las montañas de las latitudes polares son las menos vulnerables a la erosión, en parte por la aridez de los climas fríos y en parte porque los mantos de hielo continentales como los de Groenlandia y la Antártida están congelados y soldados a la roca subyacente y causan poca erosión. Por el contrario, los glaciares de montaña (de los Alpes en Europa y de Sierra Nevada en California) atacan agresivamente la roca subyacente porque resbalan sobre un colchón de agua de fusión; de modo que este tipo de glaciar puede ser el agente erosivo más potente de la Tierra.

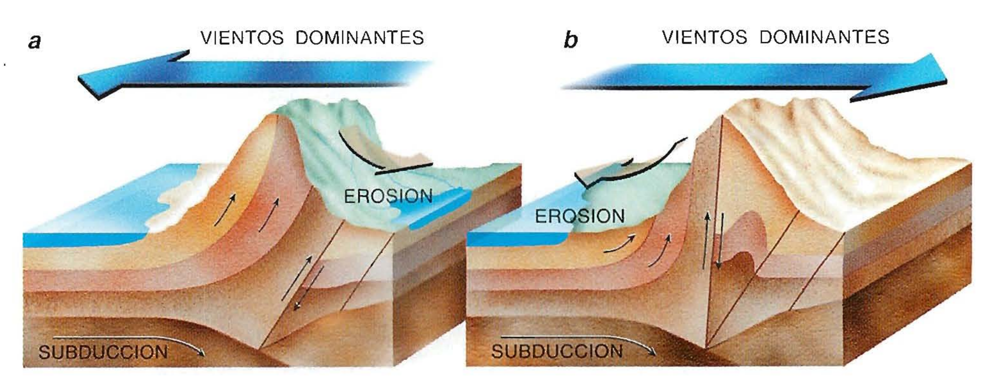
Existen otros muchos vínculos entre erosión, clima y topografía. Las montañas provocan el ascenso de los vientos que soplan sobre ellas, promoviendo una mayor precipitación sobre la cordillera en las vertientes a barlovento, e intensificando con ello la erosión. Conocido como orográfico, este efecto es responsable además de la "sombra pluviométrica" que crea desiertos en el sotavento de las cordilleras [*véase la figura 3*]. La altura también puede afectar a la erosión, puesto que la temperatura media disminuye con la altitud, así que los picos más altos tienden a tener menos vegetación y más propensión a sufrir la erosión de glaciares. En las regiones templadas, la tasa de erosión es proporcional a la pendiente media; razón que se atribuye a los procesos gravitatorios y fluviales, más fuertes cuanto más abruptas son las vertientes. Tomados en conjunto, todos estos hechos inducen a pensar que las montañas desarrollan sus propios climas a medida que crecen: se tornan típicamente más húmedas, más frías y caracterizadas por una erosión más intensa.

Los vínculos descritos demuestran que las cordilleras se entienden mejor si las consideramos un sistema. Para abordar el comportamiento de un sistema, hemos de empezar por identificar sus componentes y las interacciones que operan entre los mismos. Por revestir las interacciones suma importancia, con simples entradas en el sistema puede engendrarse un sorprendente complejo de salidas. Entre tales complejidades hemos de contar la retroalimentación, que estabiliza o desestabiliza los vínculos entre los procesos componentes. En el ejemplo elemental que hemos esbozado, la respuesta del sistema es la altura que alcanza la cordillera, mientras que la tasa de erosión es una de las entradas. A medida que las montañas se elevan, aumenta la erosión, lo que frena la tasa de crecimiento. Puesto que esta retroalimentación tiende a disminuir la entrada —a la vez que modera la respuesta—, se habla de retroalimentación negativa. La retroalimentación positiva ejerce el efecto opuesto: acelera cualquier cambio que se dé en un sistema. La creación de una sombra pluviométrica es un ejemplo de retroalimentación positiva; se inhibe la erosión, lo que permite la continuación de la rápida elevación de la cordillera. La sombra pluviométrica al norte del Himalaya ha contribuido a la formación de la elevada meseta del Tíbet.

El concepto de retroalimentación está en el centro de la nueva manera de entender la formación de las montañas y la propia repercusión de dicha gestación en el sistema Tierra. Se han reconocido o postulado diferentes tipos de retroalimentación. Uno de los resultados más inesperados de tales hallazgos estriba en cierta observación: la de que diversas e importantes realimentaciones posibilitan que el clima y la erosión, procesos superficiales, influyan profundamente en procesos tectónicos que se producen muy por debajo de la superficie (y viceversa).

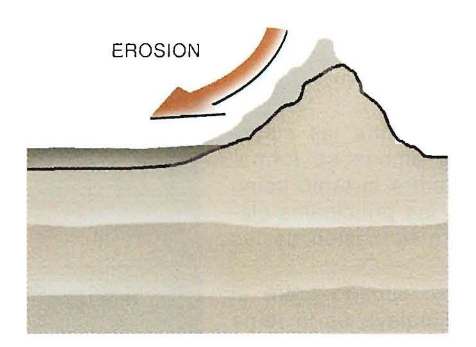
En la isostasia está la clave

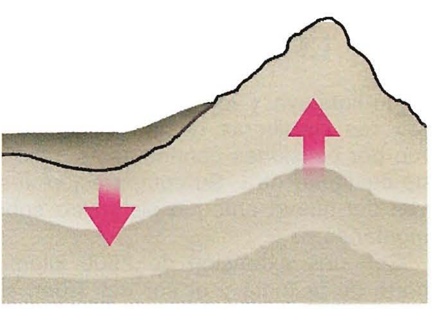
Una retroalimentación importante es la vinculada al fenómeno de la isostasia. Así se denomina la tendencia de la corteza terrestre a flotar sobre el manto subyacente, más denso y fluido. Lo mismo que cual-



3. EL EFECTO OROGRAFICO es el fenómeno en virtud del cual las montañas fuerzan la ascensión de las corrientes de aire que chocan contra ellas; a resultas de lo cual, aumentan las precipitaciones en la cima y la vertiente de barlovento. En una cordillera cercana a un océano, por ejemplo, cuando los vientos dominantes soplan hacia alta mar, en sentido contrario al de subducción (*a*), la erosión se concentra en las vertientes interiores de la cordillera, dejando ex-

quier estructura física, una cordillera, debe apoyarse sobre algo, y ese soporte lo proporcionan principalmente la resistencia de la corteza y la isostasia. Bajo las altísimas cumbres de todas las cordilleras existe una "raíz" cortical flotante, adentrada en el manto. Los icebergs ofrecen una analogía útil: puesto que la densidad del hielo es sólo el 90 por ciento de la densidad del agua, una masa dada de hielo que emerge del agua se apoya sobre una masa de hielo nueve veces mayor sumergida. La densidad de la corteza está entre el 80 y el 85 por ciento de la del manto subyacente, lo que posibilita que en él se enraícen decenas de kilómetros de corteza que aguantan montañas de varios kilómetros de altura.





4. LA ASCENSION ISOSTATICA se produce como resultado de la tendencia de una montaña a "flotar" sobre el manto, más denso y fluido (no representado). La erosión provoca la ascensión de la corteza, mientras que la acumulación de los sedimentos resultantes hunde la corteza.

La isostasia es el mecanismo clave que vincula la evolución tectónica de una montaña, o evolución interna, con su desarrollo geomórfico, o externo. Cuando la erosión de la superficie desplaza masa, la isostasia responde levantando toda la cordillera para reemplazar aproximadamente el 80 por ciento de la masa eliminada. Esta ascensión explica muchos fenómenos que resultaban enigmáticos antes de que se apreciara cabalmente el papel ejercido por la retroalimentación en la formación de las montañas.

A este propósito, determinadas medidas de alta precisión a lo largo de la costa atlántica de Estados Unidos han revelado que el suelo se eleva a una tasa comprendida entre unos milímetros y unos centímetros por siglo. Se trataba de un dato desconcertante, toda vez que los Apalaches se hallan en el interior de la placa norteamericana, donde no existe ningún borde convergente de placa que justifique el levantamiento. En coherencia con ello, algunos geólogos consideraron erróneos los resultados de tales medidas. Sin embargo, teniendo en cuenta nuestro nuevo enfoque, la ascensión medida o parte de ella puede ser la respuesta isostática a la erosión, especialmente en las áreas más elevadas de los Apalaches. La erosión concentrada en el fondo de los valles fluviales puede ser especialmente significativa, ya que puede impulsar las cumbres hasta altitudes mayores de las alcanzadas antes de que empezara la erosión. Cabe tal posibilidad porque la remoción de masa está localizada (en los valles), mientras que la respuesta isostática levanta todo el bloque montañoso y, por tanto, abarca valles y cimas.

Si bien la isostasia puede estarlos levantando durante millones de años, los paisajes no sujetos a elevación tectónica acaban sucumbiendo a la erosión. De acuerdo con diversos trabajos, grandes extensiones de Australia constituirían buenos ejemplos de paisajes muy antiguos erosionados. Estas regiones, que no han experimentado ningún levantamiento tectónico en centenares de millones de años, se encuentran como mucho a unos cientos de metros sobre el nivel del mar. Sus tasas de ascensión superficial parecen corresponderse con una respuesta exclusivamente isostática a la erosión. En montañas tectónicamente activas, pensemos en el Himalaya y los Alpes, el levantamiento medido refleja una combinación de fuerzas regidas por la tectónica con el levantamiento isostático gobernado por la erosión. Dados los ritmos a los que las montañas se elevan y se desgastan, podemos deducir que, a lo largo de la historia, han surgido y desaparecido docenas de grandes cordilleras.

¿Tiempos tectónicos poco corrientes?

La construcción de montañas, incluidas las antiguas que se formaron y erosionaron en el pasado remoto, puede dejar vestigios en el registro geológico: flujos de lava, intrusión de magma, afloramiento en superficie de rocas que estuvieron profundamente enterradas, amén de copiosos sedimentos depositados en las cuencas de tierras bajas y fósiles de plantas de las que se sabe que prosperan sólo a grandes altitudes. Mediante el estudio de tales indicadores correspondientes a períodos diferentes, cabe deducir el alcance de la formación de montañas en la Tierra en distintos momentos y, por tanto, entrever mejor el desarrollo del planeta.

Varios geólogos se han fijado en la abundancia relativa de sedimento, actividad magmática y otros indicadores potenciales de la formación de montañas. Y han llegado a la conclusión de que los últimos 40 millones de años representan una anómala oleada de actividad tectónica y formación de montañas. Mas, por otro lado, este mismo período geológico



puestas las rocas más profundas y deformadas de esa área. Cuando el viento sopla en el mismo sentido de la subducción (*b*), la erosión denuda las vertientes costeras de la cordillera, haciendo subir, literalmente, las rocas "profundas" hacia la superficie. En este caso, las vertientes interiores de la cordillera quedan en una árida zona de "sombra pluviométrica", como en el desierto de la vertiente oriental de la californiana Sierra Nevada (*fotografía*).

El Himalaya y los Apalaches

El Himalaya y los Apalaches se cuentan entre las mayores cordilleras de la Tierra. Aunque ambas se formaron por colisiones continentales, difieren entre sí tanto como de cualquier otra. Su comparación ilustra las principales claves del nuevo enfoque sistémico sobre la formación de las montañas.

Con una extensión de 2500 kilómetros, situado entre el norte de la India y el sur del Tíbet, el Himalaya es la reina de las cordilleras. En ella se alzan las cimas más encumbradas del mundo, incluido el Everest, la más alta, a 8848 metros. Junto a la meseta del Tíbet, al norte de la cordillera y al sudoeste de China, el Himalaya contiene la mayor masa montañosa total del globo. Siempre se ha considerado este cinturón como la mayor masa montañosa elevada que haya visto la Tierra en los últimos mil millones de años. Por otro lado, la meseta del Tíbet da la impresión de ser una llanura desértica. La meseta es la mayor extensión terrestre del planeta a más de 5000 metros de altitud.

Esta extrema y variada topografía se desarrolló durante los últimos 50 millones de años, como resultado de la colisión entre las placas tectónicas asiática e india. La colisión empezó a comprimir la India y el Tíbet, activando una serie de fallas de compresión de dimensiones corticales que introdujeron parte del continente indio bajo el sur de Asia. La velocidad de avance de la India hacia el norte antes de la colisión era de 15 a 20 centímetros por año; más tarde se redujo a 5. Tal desaceleración de todo un continente es menos sorprendente que el hecho de que la India haya continuado penetrando bajo Asia meridional unos 5 centímetros al año durante los últimos 40 a 50 millones de años.



LOS APALACHES Y EL HIMALAYA se formaron mediante el mismo conjunto de procesos geológicos, aunque con 250 millones de años de diferencia. Mucho más tiempo de erosión ha dado a los viejos Apalaches (*izquierda*) una apariencia menos

La India se ha adentrado 2000 kilómetros en la placa asiática, adelantándose o rezagándose 800 kilómetros, doblando el grosor de la corteza, levantando el Himalaya y la meseta del Tíbet y desplazando amplias extensiones de Indochina y China oriental hacia el este y el sudeste.

La construcción del Himalaya y la meseta del Tíbet pone de manifiesto los principios de la concepción interactiva de la formación de montañas. Por ejemplo, el levantamiento de la meseta parece que desencadenó un cambio climático, hace unos ocho millones de años, que fortaleció extremadamente los monzones asiáticos, el patrón de lluvias estacionales intensas que afecta al sur de Asia. El monzón intensificó la

revela un gran cambio climático planetario, un enfriamiento general que transformó las tierras templadas y cubiertas de vegetación de Groenlandia y la Antártida en mantos de hielo permanentes y que culminó en los glaciares que, durante los dos últimos millones de años, cubrieron Norteamérica y Europa. Nos encontramos, pues, ante dos teorías opuestas sobre formación de cordilleras y clima durante los últimos 40 millones de años: la formación intensiva de montañas causó el cambio climático planetario o fue este cambio el determinante de la excepcional generación de cordilleras.

La primera teoría afirma que la fuerza y amplitud del proceso orogénico enfrió la Tierra como resultado de la interacción entre montañas y clima. En ese marco, los glaciares tienden a autoperpetuarse: una vez establecidos, aumentan la reflectividad, o albedo, de la superficie, con lo que baja la temperatura y se promueve la formación de más hielo. Una amplia ascensión de grandes masas montañosas en los últimos 40 millones de años pudo haber incrementado el área de la Tierra cubierta por glaciares de montaña, lo que habría aumentado el albedo del planeta. El dióxido de carbono atmosférico podría haber constituido otro importante agente de retroalimentación.

De acuerdo con cierta interpretación, la formación de montañas altera la distribución planetaria de precipitaciones de lluvia y nieve, incrementando el ritmo de desintegración de las rocas por disolución y reacciones químicas. Según esta hipótesis, la meteorización química acelerada extrajo dióxido de carbono de la atmósfera, debilitando el efecto invernadero y, por tanto, induciendo un clima global más frío.

Pero quizá fue el climático el más intenso e independiente de los cambios operados en los últimos 40 millones de años. Esta teoría sugiere que el cambio climático dejó huellas geológicas que han recibido una errónea interpretación y según la cual se trataría de un período de formación acelerada de montañas. Muchos climatólogos opinan que el enfriamiento global vino impulsado por la deriva continental, que modificó la distribución de las áreas continentales y las oceánicas respecto a la latitud, así como el patrón de las corrientes oceánicas, que constituyen el principal mecanismo con que cuenta la Tierra para compensar el desequilibrio térmico que existe entre el ecuador y los polos [véase "Clima caótico" de Wallace S. Broecker; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de

NICHOLAS PINTER y MARK T. BRANDON empezaron su colaboración en el emergente campo de la tectónica activa, disciplina que hace especial hincapié en las interacciones entre deformación tectónica y topografía, cuando ambos coincidieron en la Universidad de Yale. Pinter realizó allí su investigación posdoctoral. Comparte su actual función docente en la Universidad de Illinois del Sur en Carbondale con el estudio de la expresión topográfica de los procesos tectónicos, relacionados con la actividad de las fallas y el riesgo sísmico. Brandon enseña geología estructural y tectónica en Yale. Su campo de investigación se centra en las interrelaciones existentes entre las elevaciones tectónicas y la erosión en zonas de subducción y cordilleras de sutura.



abrupta que la del Himalaya (*derecha*), al que todavía levantan potentes fuerzas tectónicas. El Himalaya es, quizá, la mayor masa montañosa que haya emergido en la Tierra en los últimos 1000 millones de años.

erosión en el Himalaya, multiplicando por más de 13 el flujo de sedimentos procedentes de los ríos Indo y Bengala. La intensificación de los monzones asiáticos causó, según parece, un incremento en la ascensión del Himalaya, ya que la isostasia (flotación) de la corteza respondió a la acentuación de la erosión en la región. Mientras, el interior de la meseta tibetana evolucionó con mayor parsimonia, pues se encuentra en la sombra pluviométrica del Himalaya y los grandes ríos todavía no se han abierto paso en ella.

Aunque los Apalaches no alcanzan la espectacularidad del Himalaya, los formaron los mismos procesos tectónicos y sufren una modelación regida por la misma retroalimentación sistémica. La diferencia fundamental radica en la edad: el Himalaya tiene unos 50 millones de años de antigüedad, mientras que la principal ascensión de los Apalaches culminó hace entre 250 y 350 millones de años.

Geológicamente, la costa oriental de Norteamérica es hoy el lado tranquilo del continente. Sin embargo, hace más de 200 millones de años era un semillero de montañas en vías de formación. A lo largo de varios centenares de millones de años que precedieron a la fecha anterior, el predecesor del océano Atlántico (océano Iapetus) estuvo subduciendo bajo Norteamérica oriental. A medida que se cerraba el Iapetus, al menos tres masas continentales menores, probablemente arcos de islas análogos al Japón actual, se incrustaron en el continente. Después, el proceso de formación de montañas culminó con la colisión de Africa con Norteamérica oriental. Los Apalaches iniciales que resultaron de estas colisiones se ha estimado que tuvieron una anchura de unos 250 a 350 kilómetros, elevaciones medias de entre 3500 y 4500 metros y picos aislados quizá mucho más altos. Un estudio sugiere que, durante los últimos 270 millones de años, la erosión ha barrido entre 4500 y 7500 metros de material de la superficie de los Apalaches. (Este hecho no significa que las montañas fueran alguna vez 4500 o 7500 metros más altas; la ascensión isostática, reiteramos, continuó levantando las montañas en respuesta a la erosión.) Durante los últimos 200 millones de años, a medida que Norteamérica se separaba de Africa y el océano Atlántico empezaba a abrirse, sucesos secundarios pudieron haber provocado episodios menores de levantamiento, pero la erosión ha sido el proceso dominante en el modelado de esta cordillera.

—N. P. y M. T. B.

1996]. ¿Cómo pudieron estos cambios climáticos remedar los efectos de la formación de montañas? A través del ascenso isostático. Según esta interpretación, el enfriamiento planetario intensificó la erosión en muchas cadenas montañosas. La erosión, agudizada sobre todo en el fondo de los valles fluviales y glaciales, provocó el incremento del ascenso de las cimas a medida que la isostasia compensaba la erosión.

Esta paradoja geológica, en la que no se sabe a ciencia cierta si el clima global es la causa y la formación de montañas el efecto, o al revés, versión a escala geológica de la precedencia del huevo o la gallina, es una circularidad frecuente en los sistemas ricos en interacciones. El que no se sepa qué inició los cambios de clima y topografía ocurridos en los últimos 40 millones de años, no signfica que se ignore que las interacciones, de muchos tipos, existentes en este sistema encierran capacidad suficiente para agrandar cualquier cambio, y que la tectónica, el clima y la erosión actuaron de forma conjunta en la creación de las pruebas geológicas que encontramos hoy.

El tirón de la erosión

El reconocimiento de diversos tipos de interacciones en el sistema de formación de montañas revela que la erosión no sólo participa en el modelado de las montañas, sino que dirige también procesos tectónicos que suceden a gran profundidad de la corteza. El factor limitante definitivo que determina el crecimiento de las montañas es la gravedad. Así, la erosión, mediante la disminución del peso de las cordilleras, acelera los procesos tectónicos que ocurren bajo las montañas. Por este motivo se puede interpretar que las montañas succionan corteza mediante los procesos erosivos y la suben a la superficie. De esta manera, la erosión deja huellas patentes en las rocas y en los patrones de deformación cortical en las montañas y bajo ellas.

El tipo de roca presente en la superficie de una montaña lo determinan, en parte, el clima local y la tasa y tipo de erosión. Vemos, pues, que la erosión influye en la composición y estructura de las montañas, y no sólo en la topografía. El metamorfismo de las rocas (cambios debidos a aumentos de presión y temperatura) y la formación de muchos minerales están condicionados por los cambios de presión y temperatura desde la superficie hacia el interior de la corteza. Según parece, aspectos secundarios del clima y la erosión, como la velocidad y la dirección del viento, o diferencias mínimas de latitud, pueden influir profundamente en la historia de la temperatura y, por tanto, en el tipo de roca que se genera en el curso evolutivo de una cordillera.

Se ha recurrido a modelos informáticos para examinar los efectos de la dirección de los vientos dominantes y la orografía en la distribución de diferentes zonas metamórficas de las cordilleras. En las montañas formadas por subducción, los vientos dominantes que avanzan en el sentido de la subducción provocan que la mayor parte de la precipitación caiga en la vertiente marítima de la cordillera, la encarada a la placa que se subduce. Se trata de un fenómeno que intensifica la deformación y la exhumación de rocas corticales de profundidad.

Pero si los vientos dominantes cursan en sentido opuesto al de la subducción, la erosión se concentra en

la vertiente terrestre de la cordillera, de modo que la deformación resulta bastante uniforme en toda la cordillera y la exhumación profunda se limita a la vertiente interior o continental.

Un estudio de los núcleos erosionados de varias cordilleras antiguas reveló, más de dos mil millones de años después de que la cordillera deviniera tectónicamente inactiva, que la huella de la orografía y del sentido del viento permanece evidente en la distribución de rocas succionadas hacia el macizo mediante una erosión regida por el clima.

Con la acumulación de pruebas de que el ascenso tectónico y la erosión pueden producirse a escalas temporales y ritmos similares, muchos han llegado a la conclusión de que la topografía de algunas cordilleras ha alcanzado la estabilidad. En este estado, el tamaño y la forma básica de las montañas pueden permanecer estables durante cientos de miles o millones de años, experimentando cambios pequeños o nulos, puesto que la tasa de erosión iguala la de ascensión.

Tres estadios

Pese al número escaso de montañas sujetas a un equilibrio perfecto, varias han podido alcanzarlo alguna vez a lo largo de su historia. Todo indica que las cordilleras pasan por tres fases distintas. La primera, el estadio generador, empieza con la convergencia de placas o cualquier otro episodio tectónico que engruesa la corteza y provoca la elevación de la topografía. A lo largo de ese estadio, las tasas de levantamiento superan las de erosión. Pero las de erosión se incrementan drásticamente conforme se acentúan las ascensiones y el relieve. En función del tamaño de la cordillera y del clima local, la ascensión puede persistir hasta que la tasa de erosión o la resistencia de la corteza impiden que su elevación media siga aumentando. Esta es la fase segunda, un estado estabilizado que continúa mientras las tasas de ascensión y erosión se mantengan iguales. Cuando disminuye la ascensión, la erosión empieza a dominar y se inicia el estadio final. La elevación media de la cordillera comienza un largo y lento declive. El ciclo puede interrumpirse o complicarse en cualquier estadio por acontecimientos tectónicos o climáticos y por las interacciones entre ellos y la erosión.

La revolución que entraña el nuevo modelo de desarrollo de montañas no desmerecerá de la que desató la tectónica de placas, hace tres décadas. Así como la tectónica de placas sirvió para explicar la distribución mundial de terremotos, volcanes, fósiles y diferentes rocas y minerales, la nueva interpretación sobre la formación de las montañas muestra el modo en que las fuerzas tectónicas, el clima terrestre y la topografía interactúan para crear algunos de los más espectaculares paisajes de la tierra. Al igual que la tectónica de placas, el nuevo modelo también esclarece algunos fenómenos que han confundido durante decenios a los geólogos. Las simulaciones por ordenador que incorporan varios preceptos principales del modelo, por ejemplo, han logrado simular los efectos de historias tectónicas complejas, variabilidad climática y distintos contextos geológicos. Las nuevas investigaciones aportarán mayor información sobre el modo en que las grandiosas cordilleras se elevan, evolucionan y se desmantelan, y habrán de revelar el papel que ejercen las montañas en la modificación del clima y la tectónica de nuestro planeta.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

LANDFORM DEVELOPMENT BY TECTONICS AND DENUDATION. T. Yoshikawa en *Themes in Geomorphology.* Dirigido por A. Pitty. Croom Helm, 1985.

EROSIONAL CONTROL OF ACTIVE COMPRESSIONAL OROGENS. C. Beaumont, P. Fullsack y J. Hamilton en *Thrust Tectonics.* Dirigido por K. R. McClay. Chapman and Hall, 1992.

"LONG-TERM" LAND SURFACE PROCESSES: EROSION, TECTONICS AND CLIMATE HISTORY IN MOUNTAIN BELTS. B. L. Isaacs en *TERRA-1: Understanding the Terrestrial Environment: The Role of Earth Observations from Space.* Dirigido por P. M. Mather. Taylor and Francis, 1992.

TECTONIC FORCING OF LATE CENOZOIC CLIMATE. R. E. Raymo y W. F. Ruddiman en *Nature,* vol. 359, n.º 6391, páginas 117-122; 10 de septiembre de 1992.

HOW FLAT IS TIBET? E. Fielding, B. Isacks, M. Barazangi y C. Duncan en *Geology,* vol. 22, n.º 2, páginas 163-167; febrero de 1994.

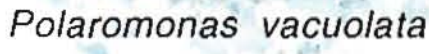
MEGAGEOMORPHOLOGY. E. A. Keller y N. Pinter en *Active Tectonics: Earthquakes, Uplift and Landscape.* Prentice Hall, 1996.

Extremófilos

Hay microorganismos que viven en condiciones letales para cualquier otro ser vivo. Las moléculas que les permiten medrar en entornos extremos hallan aplicación en la industria

Michael T. Madigan y Barry L. Marrs



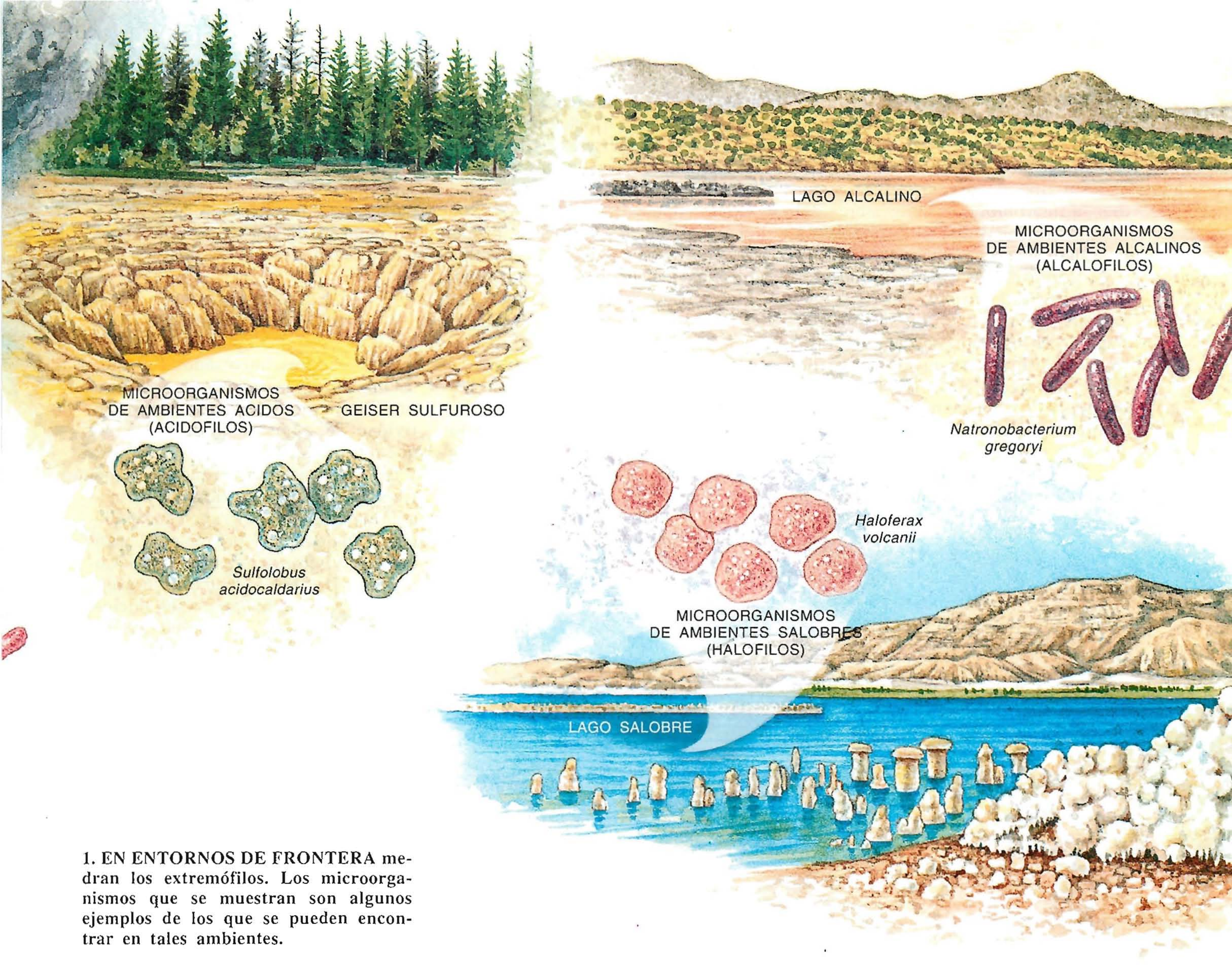


Imagínese buceando en una piscina llena de agua extremadamente fría. Surque con el pensamiento aguas en ebullición u otras a punto de congelarse. Considere la posibilidad de zambullirse en vinagre, en una solución amoniacal de uso doméstico o en una de salmuera concentrada. Tales inmersiones tendrían consecuencias desastrosas para cualquier persona. Pero no para muchos microorganismos, que han instalado su hogar en esos ambientes prohibitivos para el ser humano. A estos microorganismos se les llama, con toda razón, extremófilos. No sólo toleran esas situaciones límite, sino que se encuentran en ellas como un pez en el agua; más aún, en muchos casos, su multiplicación requiere la presencia de alguna de esas extremas condiciones.

Aunque ciertos extremófilos se conocen desde hace más de 40 años, su búsqueda se ha intensificado recientemente, al percatarse los científicos de que la vida microbiana prolifera en ambientes que, en principio, deberían ser estériles. Esta suerte de caza de extremófilos ha contado en los últimos años con el interés de la industria, en cuyo ámbito las moléculas responsables de la viabilidad de los extremófilos hallan muy diversas aplicaciones.

Particular importancia revisten las enzimas (catalizadores biológicos) que permiten desenvolverse a los extremófilos en esas circunstancias tan duras. Al igual que los catalizadores sintéticos, las enzimas, que son proteínas, aceleran las reacciones químicas sin resentirse. Durante el pasado año, el gasto mundial desembolsado en enzimas por las industrias relacionadas con la biomedicina y otras áreas se cifró en más de 2500 millones de dólares; tales biocatalizadores se utilizaron en procesos que van desde la producción de edulcorantes y tejanos descoloridos hasta la identificación de criminales y el diagnóstico de enfermedades infecciosas y genéticas. Sin embargo, las enzimas habituales dejan de funcionar cuando se exponen al calor o a otras condiciones extremas. Por tanto, los industriales que las emplean deben tomar a menudo precauciones para protegerlas durante las reacciones que catalizan e incluso durante su almacenamiento. Ahora bien, las enzimas de los extremófilos —apodadas extremoenzimas— son funcionales cuando otras no lo son; por consiguiente, su utilización industrial podría potencialmente ahorrarse esas precauciones e incrementar el rendimiento de los procesos, a la vez que reducir su coste. Sin olvidar que las extremoenzimas podrían convertirse en punto de arranque para el desarrollo de nuevos procesos industriales enzimáticos.

Hay ya una veintena de grupos de investigación en los Estados Unidos, Japón, Alemania y otros países que realizan prospecciones para aislar ex-



1. EN ENTORNOS DE FRONTERA medran los extremófilos. Los microorganismos que se muestran son algunos ejemplos de los que se pueden encontrar en tales ambientes.

tremófilos y sus enzimas. El exiguo número de extremoenzimas que ahora se emplean podría multiplicarse a corto plazo. Igual que aconteció, y sigue sucediendo, con las enzimas habituales, se tarda varios años antes de que una nueva extremoenzima entre en el proceso de fabricación industrial.

Por otro lado, la investigación sobre los extremófilos ha obligado a redibujar el árbol evolutivo de la vida. Hasta hace poco, la doctrina aceptada agrupaba en dos dominios básicos el mundo de la vida: bacteria, cuyas células son simples y carecen de núcleo diferenciado, y eukarya, cuyas células son bastante más complejas. Los nuevos datos obtenidos reforzaron lo que se reputó una herejía, cuando se formuló tiempo atrás, a saber: la existencia de un tercer dominio, el de los archaea. Desde un punto de vista estructural, los archaea carecen de núcleo y se parecen bastante a los bacteria en ciertas características. Además, determinados genes de los archaea encuentran correspondencias afines en los bacteria, prueba de que el funcionamiento de ambos tipos de organismos se parece en algunos aspectos. Sin embargo, los archaea también poseen genes que sólo portan los eukarya. Por último, los archaea presentan bastantes genes que se dirían exclusivos suyos. Precisamente estos últimos genes son los que definen la identidad diferenciada de los archaea; en ellos habrá que buscar nuevas pistas sobre la evolución de la vida primitiva en la Tierra.

Algunos necesitan calor

La investigación de los extremófilos se ha centrado, sobre todo, en los termófilos, microorganismos capaces de medrar a elevadas temperaturas. Los termófilos se desarrollan a temperaturas superiores a 45 °C. Algunos de ellos, los hipertermófilos, tienen su temperatura óptima de crecimiento por encima de los 80 °C. Ciertos hipertermófilos se multiplican incluso en ambientes cuya temperatura rebasa los 100 °C, el punto de ebullición del agua al nivel del mar. En comparación con estos organismos, la mayoría de las bacterias tienen su máxima capacidad de crecimiento en el intervalo de temperaturas comprendido entre los 25 y los 40 °C. Por otra parte, no se conoce ningún animal multicelular ni ninguna planta capaz de tolerar temperaturas superiores a 50 °C, y tampoco se sabe de ningún microorganismo eucariota que resista una exposición prolongada a temperaturas de más de 60 °C.

Desde tiempo atrás se conocía la existencia de termófilos capaces de crecer a una temperatura de 60 °C, pero los extremófilos por antonomasia —aquellos que pueden desarrollarse a temperaturas mucho más altas— se descubrieron hace sólo unos

30 años. Thomas D. Brock, profesor retirado de la Universidad de Wisconsin en Madison, y sus colaboradores observaron los primeros especímenes de este tipo de organismos al estudiar la microbiota de los géiseres del Parque Nacional de Yellowstone, en el estado de Wyoming.

El grupo de Brock comprobó atónito que hasta en los géiseres más calientes vivían microorganismos. A finales de los años sesenta identificaron el primer organismo termófilo capaz de crecer a temperaturas superiores a 70 °C. Este microorganismo, que resultó ser una bacteria, responde ahora al nombre de *Thermus aquaticus*, y ha hecho posible la utilización de la revolucionaria técnica de la PCR (reacción en cadena de la polimerasa). Por la misma época, este grupo encontró el primer hipertermófilo en un géiser extremadamente caliente que expulsaba agua con un elevado grado de acidez. Se trataba del archaea *Sulfolobus acidocaldarius*, que prolifera a la temperatura de 85 °C. En su racha descubridora, el grupo observó que determinados microorganismos medraban en agua en ebullición.

De toda esta labor, Brock extrajo la conclusión de que las bacterias pueden desarrollarse a temperaturas más elevadas que los eukarya, y predijo que pueden encontrarse microorganismos en cualquier ambiente donde haya agua en estado líquido. Otros trabajos, incluyendo los llevados a cabo desde finales de los años setenta en más géiseres así como en los alrededores de los humeros hidrotermales submarinos, han respaldado la hipótesis. En concreto, por dichas chimeneas submarinas pueden salir chorros de agua rica en minerales a una temperatura de hasta 350 °C.

Hasta la fecha se han aislado más de 50 especies de hipertermófilos, muchas de ellas por Karl O. Stetter y sus colaboradores de la Universidad de Ratisbona. El microorganismo más resistente de todos ellos, *Pyrolobus fumarii*, medra en las paredes de los humeros. Este organismo crece mejor en ambientes con temperaturas de 105 °C y puede llegar a soportar hasta 113 °C. Por contra, a temperaturas inferiores a 90 °C es incapaz de desarrollarse: diríase que, en esas condiciones, hace demasiado frío para él. Otro hipertermófilo que vive en las chimeneas volcánicas de las profundidades, *Methanopyrus*, un archaea productor de metano, se ha convertido ahora en el centro de atención, ya que puede estar muy próximo a la base del árbol evolutivo; el análisis de sus genes y actividades puede ayudar a esclarecer cómo las células primitivas lograron sobrevivir en la Tierra.

¿Cual es la temperatura por encima de la cual resulta imposible la vida? ¿Existen "hiper-hipertermófilos capaces de multiplicarse a 200 o 300 °C? Nadie tiene respuesta para tales preguntas, aunque los datos de los que disponemos sugieren que el límite superior podría estar en torno a los 150 °C. Por encima de ese valor, probablemente ninguna forma de vida puede impedir la rotura de los enlaces químicos que mantienen la estructura del ADN y de otras moléculas esenciales.

2. LOS AMBIENTES EXTREMOS despliegan a veces una vistosidad extraordinaria. Los halófilos son los responsables de la coloración rojiza que presentan los tanques de evaporación de las salinas cercanas a la bahía de San Francisco (*izquierda*). Por su parte, los microorganismos termófilos confieren un intenso color a una zona de géiseres del Parque Nacional de Yellowstone (*derecha*). Una diapositiva de una preparación microscópica de una muestra tomada directamente del borde de uno de los géiseres de Yellowstone pone de manifiesto la presencia de una abundante vida microbiana (*arriba*).

Extremoenzimas resistentes al calor

Investigadores interesados en determinar la forma en que la estructura de una molécula afecta a su actividad se aprestan a descifrar por qué las moléculas de los termófilos y de otros microorganismos extremófilos se muestran funcionales en unas condiciones que destruyen las moléculas análogas de organismos adaptados a vivir a temperaturas inferiores. Si bien estos trabajos se hallan en sus inicios, todo indica que las diferencias estructurales entre estas moléculas no tienen por qué ser necesariamente drásticas. Por ejemplo, la estructura de distintas extremoenzimas de termófilos es similar a la de enzimas análogas lábiles al calor, aunque contienen un mayor número de enlaces iónicos y de otras fuerzas internas que contribuyen en general a la estabilización de todas las enzimas.

Sea cual sea la razón que determina su mayor actividad en esas condiciones extremas, la utilización de las enzimas de los microorganismos termófilos va ganando terreno en la industria. El caso más espectacular nos lo ofrece la polimerasa Taq, que se obtiene de *T. aquaticus* y se emplea en la PCR. Esta técnica, inventada a mediados de los años ochenta por Kary B. Mullis cuando trabajaba en la Cetus Corporation, constituye el fundamento de las "huellas de ADN", empleadas por los forenses para la identificación de individuos. Esta metodología se utiliza también de forma rutinaria en la investigación biológica, en el diagnostico médico (por ejemplo, para la detección del virus de la inmunodeficiencia humana adquirida) y, cada vez con mayor frecuencia, en el análisis de la susceptibilidad genética a

ciertas enfermedades, incluidos algunos tipos de cáncer.

En la PCR, la enzima ADN polimerasa copia reiteradamente un pedazo de ADN, con lo que se obtiene una elevada cantidad del fragmento en cuestión. El proceso requiere que la mezcla de reacción se incube, alternativamente, a baja y alta temperatura. Cuando Mullis empezó a desarrollar esta metodología, la polimerasa utilizada provenía de microorganismos no termófilos, con lo que el proceso se paralizaba al realizar la incubación a la temperatura elevada. En ese momento, había que volver a añadir la enzima de forma manual, tras cada ciclo de temperatura.

Para resolver estos inconvenientes, a finales de los años ochenta los expertos de Cetus aislaron *T. aquaticus* de una muestra de campo que Brock había depositado en esa empresa 20 años antes. Purificaron su ADN polimerasa (Taq polimerasa). La elevada estabilidad de la enzima a altas temperaturas permitió el desarrollo definitivo de la técnica de la PCR. Recientemente, algunos usuarios de la PCR han reemplazado la Taq polimerasa por la polimerasa Pfu, enzima aislada del hipertermófilo *Pyrococcus furiosus* que ofrece un rendimiento mejor a 100 ºC.

Otra extremoenzima termófila de uso en la industria ha permitido incrementar el rendimiento en la obtención de ciclodextrinas a partir del maíz. Tales compuestos se utilizan para estabilizar las sustancias volátiles (verbigracia, aromas que dan sabor a ciertos alimentos), para mejorar la absorción de fármacos por el cuerpo humano y para reducir y enmascarar olores y sabores desagradables, lo mismo en alimentos que en fármacos.

Otros microorganismos prefieren el frío, ambientes ácidos o alcalinos

Hoy abundan más los ambientes fríos que los calurosos. Los océanos, cuya temperatura media oscila entre uno y tres grados centígrados, ocupan aproximadamente la mitad de la superficie terrestre. Además, vastas extensiones del Artico y de la Antártida se hallan permanentemente cubiertas de hielo o sólo se deshielan durante unas pocas semanas en el verano. Para sorpresa de muchos, y al igual que en los lugares más calientes, también en los más fríos podemos encontrar vida, aunque en este caso en forma de psicrófilos (organismos capaces de crecer a bajas temperaturas).

El equipo que encabeza James T. Staley, de la Universidad de Washington, ha demostrado que, en el hielo del océano Antártico —cuya agua esta helada durante casi todo el año— pueden encontrarse una gran cantidad de microorganismos. Estas comunidades comprenden organismos eucariotas fotosintéticos, fundamentalmente algas y diatomeas, así como una amplia diversidad de bacterias. Una bacteria aislada por el grupo de Staley, *Polaromonas vacuolota*, es un típico exponente de lo que se entiende por organismo psicrófilo: su temperatura óptima de crecimiento es de 4 ºC, mientras que por encima de 12 ºC es incapaz de multiplicarse. La industria ha empezado a mostrar interés por los microorganismos capaces de proliferar a temperaturas tan bajas, pues necesitan enzimas que trabajen a temperaturas de refrigeración —como las que procesan alimentos (cuyos productos a menudo necesitan temperaturas bajas para evitar su deterioro), las que fabrican perfumes (que se evaporan a temperaturas elevadas) y las que producen detergentes activos en el lavado en frío.

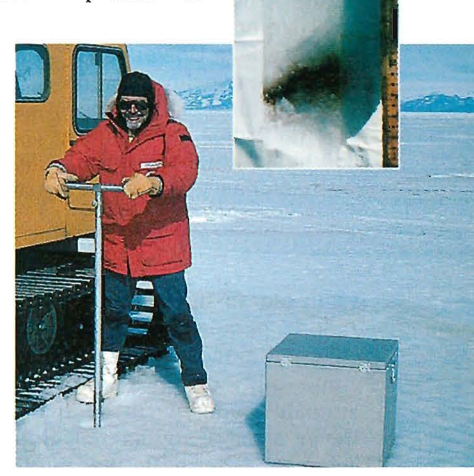
Entre los otros extremófilos que son hoy objeto de estudio citaremos los que medran en medios ácidos o alcalinos (acidófilos y alcalófilos, respectivamente). La mayoría de los ambientes naturales de la Tierra acostumbran ser neutros, con valores de *p*H comprendidos entre cinco y nueve. Los acidófilos viven en los hábitats poco frecuentes que presentan un *p*H inferior a cinco, mientras que los alcalófilos prefieren ambientes con un *p*H superior a nueve.

Los entornos con un *p*H muy ácido se originan de forma natural a partir de actividades geoquímicas (tales como la producción de gases sulfurosos en fuentes hidrotermales y en ciertos tipos de géiseres); los crea también la propia actividad metabólica de los acidófilos. Estos microorganismos viven, asimismo, en las montañas de residuos que se generan en las minas de carbón. Curiosamente, los acidófilos son incapaces de tolerar demasiada acidez intracelular, ya que ésta puede destruir nada menos que las moléculas de ADN. Estos microorganismos extremófilos sobreviven manteniendo el valor de su *p*H intracelular cercano al neutro. Sin embargo, las moléculas que han de llevar a cabo esa protección, al igual que las que se encuentran en contacto directo con el ambiente, han de poder operar en condiciones de extrema acidez. De hecho, se han aislado extremoenzimas capaces de trabajar a un *p*H inferior a uno —más ácido que el vinagre o los jugos gástricos— a partir de la pared celular y de las membranas de ciertos acidófilos.

La aplicación potencial de las extremoenzimas que toleran la acidez

3. BUSCADORES DE EXTREMOFILOS. Karl O. Stetter (*izquierda*), de la Universidad de Ratisbona, y James T. Staley (*derecha*), de la Universidad de Washington, desafían a los elementos en su empeño por encontrar extremófilos en los bordes de un géiser de Yellowstone y en los hielos del océano Antártico, respectivamente. En el interior de un núcleo de hielo se pueden apreciar los psicrófilos como una banda oscura.





Reforma del árbol filogenético inducida por el descubrimiento de los Archaea

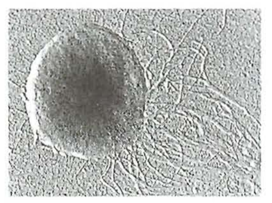
En el verano de 1996 el trabajo conjunto de muchos investigadores permitió la obtención de la secuencia completa de nucleótidos del cromosoma de *Methanococcus jannaschii*, extremófilo productor de metano que vive a temperaturas cercanas a los 85 grados C. Los datos resultantes confirmaron una vieja hipótesis, antaño ridiculizada, según la cual la vida está constituida por tres grandes líneas evolutivas, y no por las dos que consagraban los libros de texto.

Las líneas evolutivas reconocidas hasta ese momento eran bacteria (que presentan las células más simples y que carecen de núcleo diferenciado) y eukarya (las plantas, los humanos y otros animales constituidos por células con núcleo). Al comparar las secuencia de los ARN ribosómicos de muchos organismos diferentes, Carl R. Woese y sus colaboradores, de la Universidad de Illinois, concluyeron en 1977 que un grupo de microorganismos, clasificados hasta entonces entre las bacterias y conocidos con el nombre de arqueobacterias, pertenecían en realidad a una línea evolutiva diferente, que denominaron archaea. *M. jannaschii* es el primero de estos organismos cuyo cromosoma se ha secuenciado en su totalidad.

La disponibilidad de esta secuencia ha permitido comparar los genes de *M. jannaschii* con los genes secuenciados de otros organismos. El cuarenta y cuatro por ciento de los genes de *M. jannaschii* se parecen a los de los organismos que forman parte de los dominios bacteria o eukarya, o a ambos. Y en concordancia con el esquema de Woese, el 56 % restante difiere por entero de cualquier gen descrito.

El hecho de que *M. jannaschii* tenga características propias de bacteria y de eukarya, a la vez que presenta marcadas diferencias, sugiere que los archaea y los otros dos linajes poseen un remoto antepasado común. En parte a causa de que muchos archaea y algunos bacteria se encuentran adaptados a unas condiciones que parecen corresponderse con las que existían en la Tierra primitiva —especialmente elevadas temperaturas y poco o nada de oxígeno—, la mayoría de biólogos sos-





EL ALVIN (*arriba*), un submarino científico, extiende su brazo mecánico (*en el centro*) para obtener material de las proximidades de una chimenea volcánica del fondo marino. *Methanococcus jannaschii*, cuyas células son esféricas y con muchos flagelos, se aisló en 1982. El diagrama de la página siguiente describe los tres principales linajes evolutivos de la vida.

va desde su utilización como catalizadores para la síntesis de compuestos en condiciones ácidas hasta su uso como aditivos en los piensos para animales, con el fin de que puedan llevar a cabo alguna reacción en su estómago. Se halla ya muy extendido el empleo de enzimas en los piensos. Las enzimas que se seleccionan en estos casos son las que los microorganismos excretan normalmente al medio para trocear el alimento en fragmentos asimilables. Cuando se añaden a un pienso, esas enzimas mejoran la capacidad de digerir semillas de bajo coste, haciendo así innecesario el recurso a alimentos más caros.

Los alcalófilos viven en suelos empapados con carbonatos y en las lagunas cársticas, como las que se encuentran en Egipto, en el Valle del Rift de Africa y en el oeste de los Estados Unidos. Por encima de un *p*H de ocho, algunas moléculas, como el ARN, se rompen. Por tanto, los alcalófilos, al igual que los acidófilos, mantienen un *p*H intracelular cercano al neutro; sus extremoenzimas se encuentran en la pared, cerca de la superficie celular o bien se excretan al medio. Los fabricantes de detergentes de los Estados Unidos están particularmente interesados por las enzimas alcalófilas. En el Japón, cuya industria ha recibido a las extremoenzimas con gran entusiasmo, Koki Horikoshi, del Centro de Ciencia y Tecnología Marina en Yokosuka, ha realizado la mayor parte de la investigación llevada a cabo sobre las extremoenzimas alcalófilas.

Para trabajar con eficacia, los detergentes deben poder tratar y eliminar manchas de alimentos y de otras fuentes de grasa; los que mejor llevan a cabo esta tarea son las proteasas (enzimas que hidrolizan a las proteínas) y las lipasas (que degradan las grasas).

La mayoría de los detergentes del lavado resultan ser, sin embargo, muy alcalinos, con lo que se corre el riesgo de que se destruyan las proteasas y lipasas normales. Variantes alcalófilas de estas enzimas pueden solventar el problema; algunas de ellas, que además trabajan eficazmente a elevadas o bajas temperaturas, se emplean ya o están a punto de hacerlo. Se piensa también en las extremoenzimas alcalófilas para reemplazar a las normales en los procesos de fabricación de ropa descolorida, substituyendo así el clásico lavado con guijarros. Como si de piedras puntiagudas se tratase, algunas enzimas ablandan y decoloran la ropa al degradar la celulosa y liberar a los colorantes.

Una vida salobre

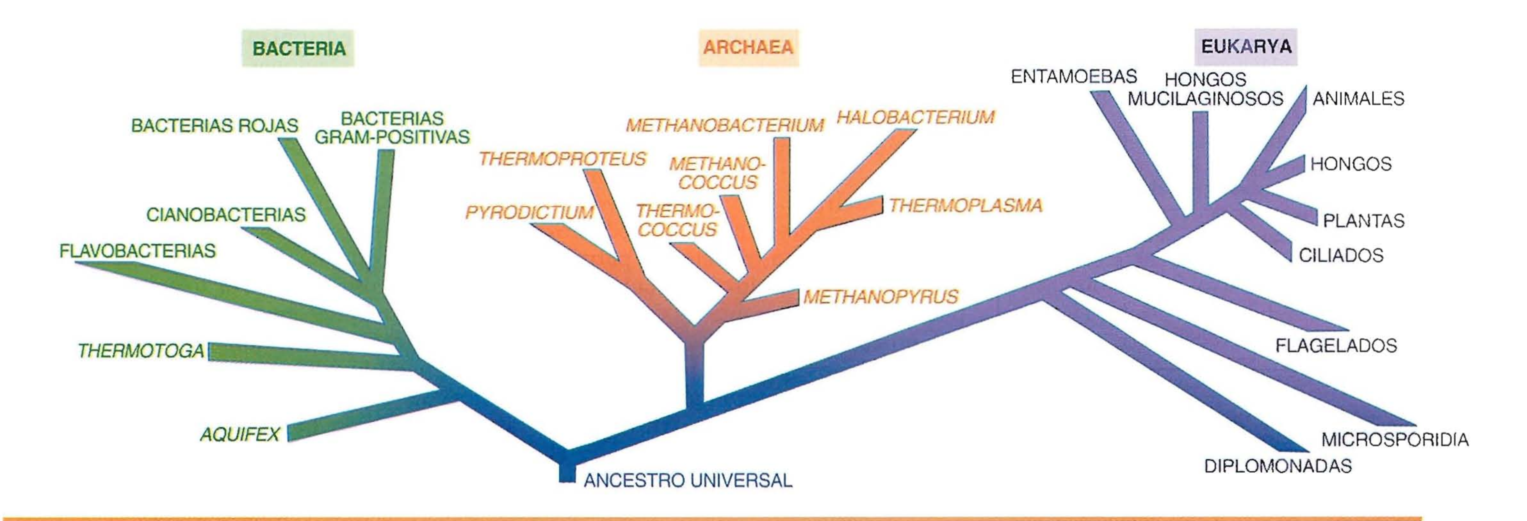
La relación de extremófilos no se acaba aquí. Otro grupo reseñable —los halófilos— ha hecho de los ambientes salinos su hogar, con preferencia por lagos salobres y cubetas de evaporación de las salinas. Estas últimas son balsas construidas por el hombre que se llenan de agua de mar, dejada a evaporar, lo que facilita la acumulación de sal que se recoge después, como si de hielo picado se tratara. Algunos ambientes salinos resultan extremadamente alcalinos, ya que la descomposición del carbonato sódico y otras sales puede dar lugar a la aparición de iones que alcalinizan el medio. No es ninguna sorpresa que los microorganismos que habitan en estos ambientes estén adaptados a la salinidad y a la alcalinidad elevada.

Los halófilos se desenvuelven en esos lugares salobres gracias a una adaptación fascinante. El agua tiende a fluir desde las zonas de baja concentración de solutos hacia las de concentración mayor. Por tanto, si una célula se encuentra inmersa en una solución con alta concentración de sal, perderá agua y se deshidratará a menos que su citoplasma contenga una concentración de sal (o cualquier otro soluto) igual o supe-

pecha que estos dos grupos aparecieron primero, divergiendo de un antepasado común relativamente poco tiempo después de la aparición de la vida. Más tarde, los eukarya surgieron a partir de los archaea. Pruebas adicionales de esta línea argumental las podemos encontrar al observar el árbol evolutivo: hipertermófilos, organismos sensibles al oxígeno, como *Methanopyrus* (archaea) y *Aquifex* (bacteria) se diferencian muy cerca de la raíz.

Los biólogos se afanan por conocer la naturaleza de los genes exclusivos de los archaea. Los genes son la matriz a partir de la cual se fabrican las enzimas y otras proteínas importantes para la estructura celular. Muchos de los genes exclusivos de los archaea codificarán proteínas desconocidas que nos ayudarán a comprender cómo sobrevivieron las células primitivas. Y, por descontado, algunas de estas proteínas quizá puedan ser útiles para el desarrollo de medicinas innovadoras o para llevar a cabo nuevos procesos industriales.

—M.T.M. y B.L.M.



rior a la de su alrededor. Para resolver el problema, los halófilos producen grandes cantidades de un soluto interno o retienen un soluto extraído del medio. Por ejemplo, el archaea *Halobacterium salinarum* acumula cloruro potásico en su interior. Como cabría esperar, las enzimas citoplasmáticas de este organismo sólo funcionarán en presencia de una elevada concentración de dicho compuesto. Sin embargo, las proteínas de las estructuras celulares de *H. salinarum* que están en contacto con el medio necesitan elevadas concentraciones de cloruro sódico para su correcto funcionamiento.

Las posibles aplicaciones industriales de las enzimas halotolerantes no son tan evidentes como las de otras extremoenzimas. Si bien hay una al menos en estudio. Nos referimos a la conveniencia de utilizar enzimas halotolerantes para aumentar el rendimiento en los procesos de extracción de crudo de los pozos petrolíferos.

Para crear corredores por donde el petróleo atrapado pueda fluir en un pozo activo, los trabajadores bombean hasta el fondo del yacimiento una mezcla de arena y de cierto polisacárido viscoso, aislado de la planta leguminosa *Cyamopsis tetragonoloba* (goma guar). Provocan luego una explosión para fragmentar la roca circundante y forzar que la mezcla penetre en los intersticios que se acaban de generar. La goma guar facilita la dispersión de la arena por estos intersticios, aumentando su luz. Mas, para que el petróleo pueda brotar, debe eliminarse la goma. Si justo antes de la inyección de la mezcla se añade una enzima capaz de hidrolizar la goma guar, ésta, antes de degradarse, retiene su viscosidad el tiempo suficiente para facilitar la dispersión de la arena por los citados instersticios.

Tal es al menos lo que debería suceder en el caso ideal. Pero los pozos de petróleo son lugares calientes y a menudo salobres, motivos por los cuales las enzimas ordinarias pierden actividad prematuramente. Una extremoenzima cuya actividad óptima se desarrollara a elevada temperatura y a altas concentraciones salinas no intervendría en la superficie del pozo, pues a ese nivel son más bajas la temperatura y la concentración salina. La enzima se iría activando a medida que fuese penetrando en el interior del pozo, ya que la temperatura va aumentando con la profundidad. Semejante actividad retardada haría que la mezcla de arena dispusiese de más tiempo para percolar a través de los estratos donde está almacenado el petróleo. Así mismo, la tolerancia de la enzima ante el calor y la sal le permitiría operar durante más tiempo y, por consiguiente, aumentar el rendimiento del proceso de hidrólisis de la goma. Las primeras pruebas con este tipo de enzimas realizadas en el laboratorio de la Universidad estatal de Carolina del Norte por Robert M. Kelly han resultado alentadoras.

Si la única forma de obtener extremoenzimas fuese mediante cultivos a gran escala de extremófilos, la aplicación industrial de sus proteínas sería inviable. En raras ocasiones los microbiólogos encuentran abundante cantidad de una misma especie en la naturaleza. Hay que purificar el organismo deseado, por lo común a través del aislamiento y cultivo posterior de sus células en el laboratorio. Pero no es tarea fácil, aunque sí muy cara, el aislar y producir a gran escala organismos con estilos de vida extremos.

Aislamiento de extremoenzimas

Para nuestra fortuna, las extremoenzimas pueden obtenerse mediante las técnicas de ADN recombinante sin necesidad de preparar cultivos en masa de sus organismos de origen. Los genes, constituidos por ADN, especifican la composición de

MICHAEL T. MADIGAN y BARRY L. MARRS comparten un particular interés por las bacterias fototróficas. Madigan obtuvo su doctorado en bacteriología por la Universidad de Wisconsin en Madison en 1976 bajo la dirección de Thomas D. Brock. En la actualidad, es catedrático de microbiología en la Universidad del Sur de Illinois en Carbondale. Ha estudiado la diversidad y las características metabólicas de las bacterias fototróficas, especialmente en ambientes extremos. Marrs se doctoró en biología por la Universidad de Case Western Reserve en 1968. En su dilatada carrera ha pasado por la industria y la academia. Hasta hace poco tiempo rigió la empresa Recombinant Biocatalysis, fundada por él, que comercializa enzimas de extremófilos. En la actualidad, dirige Photosynthetic Harvest, empresa que él creó también, cuyo objetivo es la utilización de compuestos químicos en plantas industriales ecológicas.

las enzimas y de otras proteínas fabricadas por las células; estas proteínas ejecutan la mayor parte de las funciones celulares. Tan pronto como los microbiólogos consiguen los genes de un extremófilo aislado de la naturaleza o a partir de cultivos de laboratorio a pequeña escala, pueden clonarlos y aplicarlos a la fabricación de las proteínas correspondientes. Gracias, pues, a la técnica del ADN recombinante, los expertos pueden insertar los genes en microorganismos ordinarios o "domesticados", que se encargarán luego de la producción ilimitada de enzimas puras.

Hasta la fecha se han empleado dos estrategias diferentes para identificar extremoenzimas de valor potencial. El método clásico comporta que los microbiólogos logren, al menos, un pequeño volumen de cultivo del extremófilo que se ha aislado de un ambiente interesante. Si se busca, por ejemplo, enzimas que degraden proteínas, se ensayará si los extractos de las células cultivadas están capacitados para hidrolizar esta clase de moléculas. Si detectan esta actividad, los microbiólogos pondrán en funcionamiento toda la batería de técnicas bioquímicas disponibles con el fin de aislar las enzimas responsables de esa actividad, así como los genes que las codifican. En este caso, se ha de esperar que los genes puedan expresarse en el huésped "domesticado" y fabricar, por ende, las enzimas deseadas.

En la segunda estrategia, los microbiólogos prescinden de los cultivos de extremófilos. Optan por aislar el ADN de todos los organismos vivos presentes en una muestra de agua, tierra o cualquier otro material proveniente de un ambiente extremo. Seguidamente, y utilizando de nuevo la técnica del ADN recombinante, introducen pequeños fragmentos del ADN obtenido en un huésped "domesticado" —lo ideal sería la introducción de un solo inserto por célula huésped— sin necesidad de saber qué codifican los genes presentes en dichos fragmentos. A continuación, ensayan si las colonias formadas poseen una actividad enzimática nueva. Si detectan alguna, saben que su responsable será el inserto en cuestión, y que ese fragmento de ADN es capaz de expresarse en el huésped "domesticado". Esta estrategia permite eludir muchos de los obstáculos que pueden surgir durante el desarrollo del proceso tradicional. Además, los microbiólogos pueden buscar genes que codifiquen determinadas enzimas a partir de poblaciones mixtas de microorganismos, sin que se requiera el cultivo puro de extremófilos, ya que fuera de sus ambientes naturales el crecimiento de estos organismos puede resultar problemático.

Aunque los microorganismos que existen en la Tierra presentan una increíble diversidad, los expertos raramente encuentran en ellos la enzima ideal para una función determinada. De ahí que hayan empezado a modificar las extremoenzimas para cubrir las demandas específicas de la industria. Por ejemplo, tras el descubrimiento de una extremoenzima que alcanza un óptimo rendimiento en la degradación de proteínas a temperaturas elevadas, los microbiólogos pueden alterarla para que opere en un intervalo más amplio de acidez o salinidad.

Para acometer tales modificaciones, los expertos acostumbran optar por una de las dos aproximaciones siguientes. Los que se deciden por el "diseño racional" abordan primero las bases estructurales de la propiedad de interés. Alteran luego el gen de la enzima al objeto de que la proteína resultante incorpore la propiedad deseada. Los que prefieren la segunda opción, de "evolución dirigida", introducen cambios al azar en el gen que codifica la enzima seleccionada, creando miles de versiones diferentes de dicha enzima. A continuación, se analiza la colección obtenida para comprobar si alguno de los cambios introducidos mejora sus propiedades. A esta última estrategia algunos la llaman edisoniana, en memoria de Thomas Edison, quien, para obtener un material que sirviese de filamento en las bombillas, probó todos los materiales que tenía a mano, desde palillos de bambú hasta hilo de seda, y eligió aquel que mejor le había funcionado.

Hasta el momento, apenas si ha sufrido modificación la estructura original de la mayoría de las extremoenzimas industriales. En cualquier caso, tanto el diseño racional como la estrategia edisoniana permitirán mejorar las aplicaciones de las extremoenzimas. Asimismo, estas estrategias pueden ayudar a convertir enzimas de microorganismos ordinarios en extremoenzimas artificiales.

El descubrimiento de los extremófilos ha abierto nuevas perspectivas en el desarrollo de enzimas con actividades catalíticas fuera de lo común. Para que cualquier enzima nueva adquiera interés comercial, sus fabricantes han de tener en cuenta los costes de producción. Por ejemplo, asegurándose de que los microorganismos domesticados que se utilizan para la síntesis de extremoenzimas son capaces de fabricarlas en copiosa cantidad. La aceptación industrial de nuevas extremoenzimas puede verse afectada por las dificultades inherentes al perfeccionamiento de las técnicas de manufacturación y por la resistencia de las industrias a innovar sistemas de producción que funcionan razonablemente bien. De cualquier forma, parece inevitable que, ante las ventajas que estas enzimas aportan, se generalice su empleo en distintos sectores industriales.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ENZYMES ISOLATED FROM MICROORGANISMS THAT GROWN IN EXTREME ENVIRONMENTS. M. W. W. Adams y R. M. Kelly en *Chemical and Engineering News*, vol. 73, n.º 51, págs. 32-42; 18 de diciembre de 1995.

EXTREMOPHILES. Número especial de la *Federation of European Microbiological Societies (FEMS) Microbiology Reviews*, vol. 18, números 2-3; mayo de 1996.

HYPERTERMOPHILES IN THE HISTORY OF LIFE. K. O. Stetter en *Evolution of Hydrothermal Ecosystems on Earth (and Mars?)*. Coordinado por Gregory R. Bock y Jamie A. Goode. John Wiley & Sons, 1996.

BROCK BIOLOGY OF MICROORGANISMS. Octava edición. Michael T. Madigan, John M. Martinko y Jack Parker. Prentice Hall, 1997.

La invención de la fotografía, recuperada

La reconstrucción experimental de los procedimientos de Niépce, fundada en la interpretación de sus cartas, pone de manifiesto el genio edisoniano del inventor de la fotografía

Jean-Louis Marignier y Michel Ellenberger

Nicéphore Niépce (1765-1833) inventó el primer procedimiento fotográfico. Satisfizo así el viejo anhelo de los humanos de fijar para la eternidad un momento de la vida. Sus investigaciones, emprendidas en 1816, duraron más de un decenio y sus resultados principales quedaron consignados en su *Notice sur l'héliographie*, de 1829.

Es cierto que, en general, los historiadores de la fotografía hacen justicia a este inventor genial, pero no lo es menos que valoran incorrectamente la originalidad de su aportación y que subestiman las dificultades que hubo de afrontar, pues analizan su obra basándose en conocimientos actuales, que el padre fundador, evidentemente, no podía tener. Niépce se sirvió de manera personal de conceptos científicos y técnicos de su época, y los enunció en un lenguaje que hay que saber descifrar.

En efecto, la primera tarea del historiador de la ciencia ha de ser la comprensión de estos documentos, su interpretación en términos actuales para la valoración de su mérito y de lo que estaba en juego. En el caso de Niépce, el análisis de los textos dista de ser suficiente. Para captar el significado de un ensayo, o las causas de la adopción o rechazo de tal o cual operación, es imprescindible acompañarle por las diversas vías de su andadura experimental. Y eso es, precisamente, lo realizado por uno de los autores (Marignier).

La reconstrucción de los experimentos de Niépce se hizo analizando los documentos originales. Quedan así más claras las observaciones del inventor y se colman las lagunas de sus escritos, donde no detalla ciertos fenómenos que juzga evidentes. La reconstrucción experimental histórica permite la comprensión de los principios, mecanismos y resultados de los procedimientos, más la eliminación de las inexactitudes en que incurren los historiadores de la fotografía (que no son químicos). A pesar de los 160 años transcurridos, la repetición en su forma original de experimentos de importancia histórica no se había acometido en su plenitud. Podemos ahora seguir los pasos de Niépce con el propósito de captar "el instante genésico" de la fotografía.



1. NICEPHORE NIEPCE (1765-1833) fue inventor prolífico. Puso a punto el primer motor de explosión en 1807. A partir de 1816 se consagró al desarrollo de la fotografía.

La correspondencia de Niépce, una fuente en clave

En 1816, Nicéphore Niépce cuenta cincuenta y un años. Reparte su tiempo entre su casa de Châlon-sur-Saône y una propiedad, cercana, en Saint-Loup-de-Varennes, donde ha instalado su laboratorio. La abundante correspondencia que cruza con su hermano Claude, dos años mayor que él, residente en Londres, proporciona, día a día, un reflejo detallado de sus actividades; Niépce asegura la difícil gestión del patrimonio familiar y prosigue sus investigaciones con pasión y perseverancia.

Describe a su manera los ensayos, los tanteos y las conclusiones que va extrayendo. Esta correspondencia, una vez descifrada y situada en su contexto, equivale a cuadernos de laboratorio. Es de prosa clara, rica en imágenes, que muestra una vivaz e intuitiva comprensión de la naturaleza. En ella, Nicéphore Niépce revela ser inventor inquieto, que alía la agilidad de espíritu de la Ilustración con la sensibilidad del primer romanticismo.

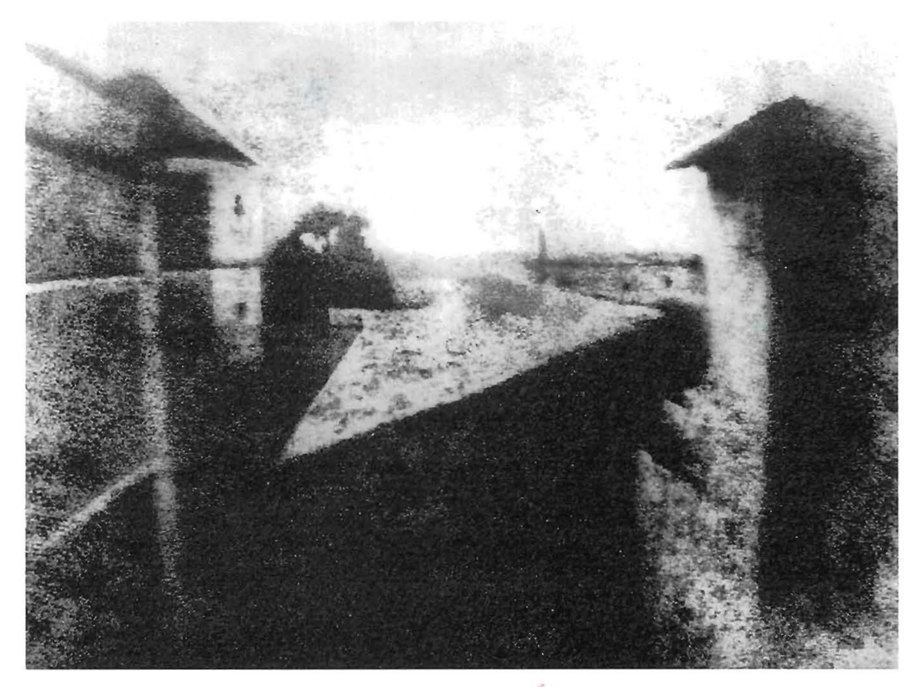
En 1816, cuando se inician las investigaciones de Nicéphore que habrían de llevarle a la heliografía, los dos hermanos Niépce ya tienen a sus espaldas una carrera de inventores: han

puesto a punto el primer motor de combustión interna, el *pyréolophore* (1807); se han interesado por la propulsión de los barcos, por el bombeo de aguas, por la extracción del índigo, por los "vegetales nutritivos". Abiertos, pese a su alejamiento de la capital, a las corrientes de la época, toman parte activa en el advenimiento del mundo industrial.

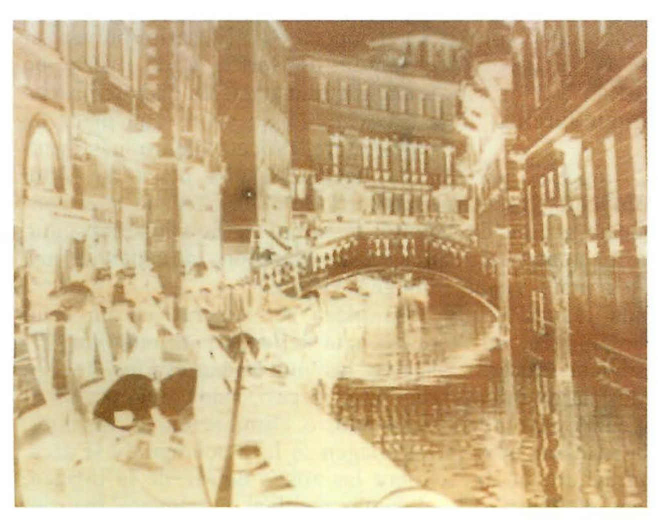
La idea que guía las investigaciones de Nicéphore Niépce, cual la expondrá en su *Notice* de 1829, consiste en *reproducir espontáneamente, por acción de la luz, con degradaciones de tintas del negro al blanco, las imágenes recibidas en la cámara oscura*. Proyecto que viene de antiguo, pues le recordará a su hermano (carta del 16 de septiembre de 1824) que han trabajado juntos en este descubrimiento durante su estancia en Cagliari, en Cerdeña (1797). La idea de conservar por medios químicos la imagen que se forma en la cámara oscura había sido propuesta ya en 1802 por Thomas Wedgwood (1771-1805), pero no hay razón alguna para suponer que los hermanos Niépce tuvieran noticia de las tentativas de este investigador prematuramente fallecido.

El mes de mayo de 1816 aportó al inventor grandes satisfacciones. Sobre una hoja de papel extiende una película de un compuesto fotosensible que se oscurece a la luz, el cual, habida cuenta de textos posteriores, tenemos pleno derecho a creer que era "muriato de plata" (cloruro de plata). Coloca la hoja en el fondo de la cámara oscura. Por haber sido cambiado el objetivo a resultas de un incidente, la distancia focal utilizada (diríamos hoy) es más corta. El incidente es fecundo. Niépce comprueba que la imagen de la vista desde su ventana que "se pinta" sobre el papel es más luminosa y más nítida de lo previsto, aunque, sobre la capa sensible, el orden de las tintas aparece invertido.

El fondo del cuadro es negro, y los objetos son blancos, es decir, más claros que el fondo. No obstante, afirma Niépce, *la posibilidad de pintar de esta manera me parece casi demostrada* (carta del 5 de mayo de 1816). Nicéphore ha realizado ese día



2. VISTA DESDE LA VENTANA, en Saint-Loup-de-Varennes. Esta fotografía, realizada por Niépce en 1827, es la única que nos ha llegado. Es una imagen negativa en betún de Judea, subexpuesta, sobre estaño blanco reflectante. A causa de la subexposición, el barniz remanente en los lugares iluminados, atacado por el disolvente, se tornó mate. En un lugar oscuro y con iluminación oblicua, el estaño refleja la sombra (*partes negras*), mientras que el barniz, que difunde la luz, aparece claro (*partes blancas*) y la imagen parece ser un positivo. El hecho de que los dos muros opuestos a izquierda y derecha se vean iluminados a la vez da testimonio de lo prolongado del tiempo de exposición (un día, cuando menos). Esta fotografía de la imagen obtenida por Niépce se realizó con iluminación rasante en 1952. En el copiado, el contraste se aumentó artificialmente; se retocó, además, la fotografía. El resultado dista bastante de la placa de Niépce.





3. HELIOGRAFIA con betún de Judea sobre estaño, realizada de igual modo que la placa empleada por Nicéphore Niépce para obtener la figura precedente. Visto de frente, el estaño refleja la luz y la imagen aparece en negativo (*izquierda*). En un lugar oscuro y con iluminación oblicua, la imagen aparece en positivo (*derecha*).

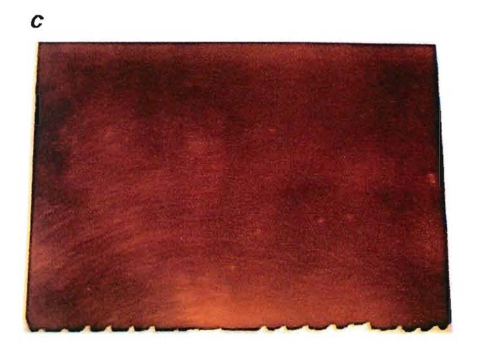
a



b



c



4. PROCEDIMIENTO FOTOGRAFICO de Niépce. El betún se reduce a polvo y se disuelve en esencia de lavanda. La disolución, de color marrón, se extiende sobre una placa de cobre recubierta de plata (*a*), y después, secada con calor. Tras el secado queda sobre la placa de plata un película de barniz bituminoso, muy fina, brillante, de color bermejo. Esta película de barniz es fotosensible: su solubilidad disminuye con la exposición a la luz, que se efectúa en el fondo de una cámara oscura (*b*). Con un objetivo de idéntica luminosidad que la lente utilizada por Niépce, el tiempo de exposición es de tres a cuatro días para un paisaje a pleno sol. Tras la exposición a la luz no se observa sobre la placa indicio alguno de la imagen proyectada (*c*). La placa se sumerge entonces en un baño de esencia de lavanda diluido, que disuelve las partes que no han recibido luz, o muy poca. El betún de las partes iluminadas se vuelve insoluble en la esencia de lavanda

el primer negativo fotográfico sobre papel de la historia. Pero el negativo, que no está fijado, continúa ennegreciéndose al observarlo a la luz.

Multiplica los experimentos, construye nuevas cámaras oscuras, a cuyos objetivos dota de "discos de cartón perforado" (diafragmas) para aumentar la nitidez (la profundidad de campo aumenta al reducir la apertura del diafragma).

Envía a su hermano nuevas *pruebas* (la palabra ha llegado hasta hoy) de diferentes formatos. Y define un triple programa: 1) *conferir mayor nitidez a la representación de los objetos;* 2) *transponer los colores;* 3) *y, por último, fijarlos, que no será lo más fácil; pero* [...] *no carecemos de paciencia, y con paciencia se alcanzan todas las metas.* (Carta del 19 de mayo de 1816.) En lenguaje actual: mejorar la óptica; invertir la imagen negativa en positiva (Niépce utiliza las palabras *tinta* y *color* para expresar *valor*); fijar la imagen (otro término que se ha impuesto). Este último punto es el más importante, puesto que la imagen continúa ennegreciéndose al examinarla bajo la luz.

Niépce intenta ya obtener imágenes positivas a partir de una sola prueba en negativo: *Introduciendo en la caja óptica una prueba bien marcada sobre un papel* [...] *recubierto de la sustancia que yo empleo, la imagen vendrá a pintarse sobre este papel con sus colores naturales, pues las partes negras de la prueba, siendo más opacas, interceptarán más o menos el paso de los rayos luminosos.* (Carta del 16 de junio de 1816.) Este experimento, cercano a la llamada positivación por contacto, fracasa.

El inventor busca después compuestos que, en lugar de oscurecerse, se decoloren por la luz. De todos modos, el problema más difícil sigue siendo el fijado, es decir, la eliminación del producto inicial que no se ha transformado por la luz.

Prepara empíricamente un inventario de cuerpos sensibles a la luz, condición preliminar al advenimiento de una nueva ciencia, la fotoquímica. Se esfuerza también en conjugar la acción del *fluido luminoso* sobre los compuestos sensibles con la de los ácidos sobre la placa de cobre que emplea el grabador. Se le ocurre extender un ácido sobre una placa de metal y exponerlo a la luz; Niépce esperaba que la potencia del ácido dependiera de la intensidad de la luz y que este ácido mordiera el metal en mayor o menor medida en función de los matices de la imagen proyectada. Desdichadamente, la acción de ninguno de los ácidos conocidos depende de la luz.

La noción de imagen latente

Ensayo tras ensayo, Niépce va perfilando su gran proyecto. Ya no le parece necesario que la acción de la luz determine sobre el compuesto cambios perceptibles a simple vista; podría ser una segunda reacción la que hiciera aparecer la imagen.

En busca de la sustancia fotosensible Niépce lee tratados de química, diccionarios y enciclopedias. Aprende en ellos que la solubilidad en alcohol de la resina extraída de un árbol de Santo Domingo, el guayaco, varía en función de la exposición a la luz. Tendríase ahí, por primera vez, un método químico para distinguir la sustancia transformada por la luz de la que no lo está y, por ende, de fijar la imagen. Los ensayos realizados por Niépce a la luz del sol son concluyentes, pero no se reproducen tras la exposición en cámara oscura. Hoy sabemos la causa: tan sólo los rayos ultravioletas transforman la resina del guayaco, y éstos los filtraba el cristal ordinario de la lente con que estaba equipada la cámara oscura. Sin embargo, este primer y decepcionante ensayo con un cuerpo orgánico (en lenguaje actual) pone al inventor sobre la pista del betún de Judea, o asfalto, que se extraía, sobre todo, de la mina de Parc, en Seyssel, a un centenar de kilómetros de Châlon-sur-Saône.

Una película fotosensible: el betún de Judea

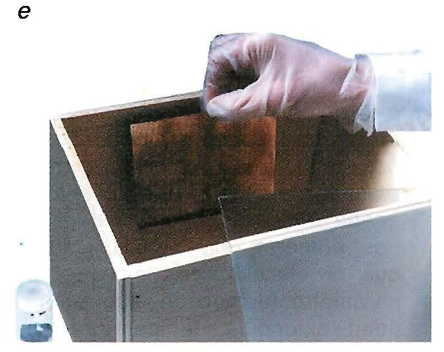
Para reproducir el experimento de Niépce, es necesario pulverizar el betún de Judea y disolverlo en esencia de lavanda. La disolución viscosa se extiende sobre una placa de metal (en el procedimiento más avanzado, en 1828, una placa de cobre recubierta de plata), secada, y el conjunto se sitúa en la cámara oscura. Tras la exposición, no aparece una imagen visible.

La placa se sumerge en un baño de esencia de lavanda diluida, que disuelve las únicas partes que no han recibido, o casi, nada de luz. Es el decapado, o eliminación de residuos. La imagen se lava con agua y se seca. Sobre las zonas de luz de la imagen, el betún residual permanece marrón; en los lugares de sombra aparece el metal brillante. La imagen, con iluminación cenital, es un negativo.

d



e



f



y resiste: las zonas iluminadas permanecen en la placa (*d*). Tenemos, pues, un negativo. Para obtener un positivo, la imagen negativa en betún (de la casa de Niépce en Saint-Loup-de-Varennes) se introduce en una caja (*e*) donde se han colocado cristales de yodo que se subliman espontáneamente. Los vapores de yodo atraviesan la imagen bituminosa y atacan la plata de la superficie; se forman depósitos de yoduro de plata, tanto mayores cuanto más delgado sea el barniz. Expuesto a la luz, el yoduro de plata se transforma en micropartículas de plata. En el lugar de las partes claras del negativo en betún, la placa de plata se vuelve negra, mientras que, en las partes oscuras, la placa protegida por la espesa capa de betún permanece brillante. Una vez eliminado el barniz con alcohol, aparece la imagen positiva sobre la placa de plata (*f*). Las heliografías así obtenidas son de gran calidad: se pueden separar 102 pares de trazos por milímetro.

Los experimentos, a partir de 1822, van dando resultados alentadores. Niépce obtiene una imagen negativa permanente, una *heliografía*; falta tan sólo extraer una imagen positiva.

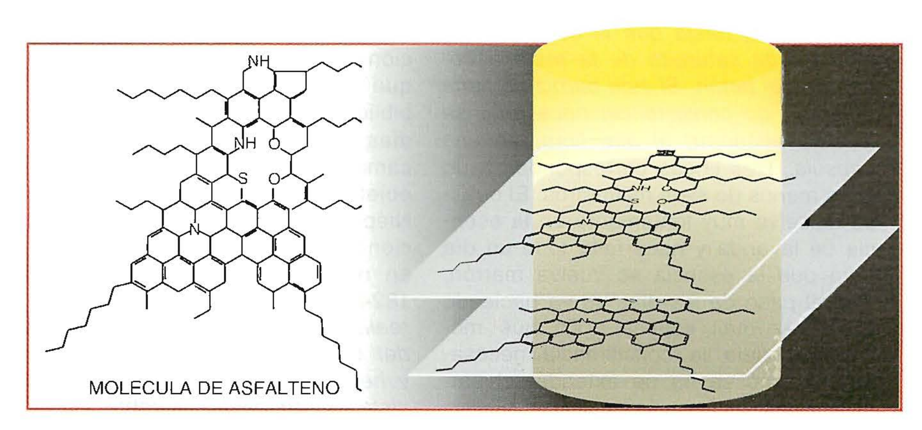
A partir de aquí, sus investigaciones se orientan en tres direcciones.

1. *Hacer aparecer la imagen positiva por un sencillo efecto de iluminación.* Es probable que el procedimiento le fuera revelado por obtención de imágenes subexpuestas. En las partes de la imagen correspondientes a las zonas de sombra del motivo se ve aparecer el metal pulido. Por otra parte, a causa de la subexposición, el barniz que permanece sobre la placa, en las zonas de luz, se encuentra insuficientemente reticulado. Queda entonces sólo parcialmente atacado en el baño de esencia de lavanda diluido y se torna mate. Bajo iluminación oblicua, mientras que las partes pulidas reflejan la sombra y son poco luminosas, el barniz mate ofrece aspecto más claro y la imagen se vuelve positiva. Estamos viendo así los primeros daguerrotipos.

Niépce, que ya había observado este fenómeno en 1824, no se interesará por él hasta 1827, volviendo a abandonarlo un año después. De este tipo es la célebre heliografía *Point de vue du Gras* (de 1827 y no de 1826), que es la fotografía más antigua del mundo y se conserva en atmósfera de helio en el Centro Harry Ransom de Austin (Texas). Uno de los autores (Marignier) ha podido examinarla fuera de su vitrina en las condiciones de iluminación apropiadas, comprobar los matices imposibles de apreciar en las reproducciones y explicar la génesis de los mismos.

2. *Transformar la placa heliográfica en grabado al agua fuerte.* Se sumerge la placa en un baño de ácido que muerde las regiones metálicas no protegidas por el barniz. Las sombras quedan así grabadas en el metal y puede eliminarse el barniz. La placa (de cobre o de estaño) se impregna con tinta, se limpia y se cubre con una hoja de papel húmedo. Bajo una prensa, el papel va a buscar la tinta al fondo de las regiones grabadas, mientras que las superficies no atacadas permanecen blancas. Resulta una imagen positiva de la que se puede hacer una pequeña tirada. Niépce trabaja en esta dirección a partir de 1824. El inconveniente del grabado al ácido es la carencia de matices; sólo es adecuado para la reproducción de dibujos de trazos o de grabados cuyos degradados se obtienen por rayado o plumeado. Niépce sólo se valdrá de este método para reproducir grabados. En nuestros días quedan solamente nueve ejemplares en los museos de Francia y de Gran Bretaña. Este procedimiento dio origen al *fotograbado*, cuyo inventor es, indiscutiblemente, Niépce. El betún de Judea, por otra parte, se ha venido utilizando con dicho fin durante decenios. Este mismo principio sirve en nuestros días, en microlitografía, para la fabricación de microcircuitos electrónicos.

3. *Invertir la imagen negativa por acción química.* El principio es el siguiente: se ennegrecen sobre el negativo de betún las regiones metálicas brillantes (las sombras del motivo, puesto que es un negativo) y se elimina después el barniz en las regiones oscuras restantes (correspondientes a las partes iluminadas) para dejar que aparezcan los matices de claroscuro. Niépce trabaja en ello a partir de 1828. Utiliza placas de me-



5. EL BETUN DE JUDEA, la película fotosensible que Niépce utilizaba, se extiende sobre una placa de metal plateado. La película es un asfalto constituido, a escala atómica, por láminas paralelas. Entre las láminas del apilamiento se forman enlaces locales; permanecen tras la disolución de las partes solubles y aparecen en marrón sobre la placa metálica.

Análisis experimental de los trabajos de Niépce

Emprendí en 1989 las investigaciones sobre el primer procedimiento fotográfico inventado por Nicéphore Niépce, tras haber comprobado que nadie había vuelto a hacer heliografías y que ninguna de las realizadas por Niépce había sobrevivido. Tan sólo subsiste el negativo de la figura 2, pero este boceto degradado por el tiempo no constituye la forma definitiva de su invento.

Al estudiar el procedimiento de Niépce con betún de Judea tropecé con contradicciones. Los libros de historia de la fotografía que describían el procedimiento eran unánimes; según sus autores, el betún de Judea, que es marrón, se blanqueaba a la luz, lo que permitía obtener directamente un positivo. Sin embargo, al referirse a la placa recubierta de barniz marrón, Niépce había escrito: *Tras haberla expuesto suficiente tiempo* [a la luz] *para que tenga lugar el efecto, nada indica que éste exista realmente; porque la huella permanece imperceptible.* ¿Significaba esto que una vez secado el betún sobre la placa se había vuelto completamente blanco? Dado que la lectura atenta de la correspondencia no permitía zanjar la cuestión, decidí reproducir el experimento.

Los primeros ensayos se realizaron con betún comercial. Era necesario determinar qué cantidad de betún tenía que disolverse en la esencia de lavanda. En una primera lectura, la descripción dada por Niépce parece sencilla: *Lleno hasta la mitad un vaso de este betún pulverizado. Vierto sobre él, gota a gota, aceite esencial de lavanda hasta que este betún no absorbe más y quede sólo bien empapado. Añado a continuación lo suficiente de este aceite esencial para que sobrenade, alrededor de tres líneas, por encima de la mezcla, que es preciso cubrir y abandonar a un calor suave, hasta que la esencia añadida quede saturada de la materia colorante del betún. Si este barniz no tiene el grado de consistencia necesaria, se le deja evaporar, al aire libre, en una cápsula.* Tres líneas corresponden a un poco menos de siete milímetros. El betún se disuelve muy lentamente en la esencia de lavanda y hace falta todo un día para que la esencia se vuelva marrón. Con el paso de los días se va haciendo cada vez más espesa. ¿En qué momento poseía la consistencia necesaria? ¿Cómo se ha de extender el barniz? ¿Con muñequilla?

Niépce indica, en un escrito posterior, que él extiende sus barnices con pincel. Así lo hice yo. Una vez endurecida la placa, Niépce explica: *Se coloca a continuación la plancha sobre un hierro caliente* [...] *y cuando el barniz ya no es pegajoso, se retira la plancha para dejar que se enfríe y se acabe de secar a temperatura suave.* Las primeras experiencias mostraron que la elección errónea de un solo parámetro (tiempo de disolución, cantidad extendida, temperatura de secado, tiempo de calentamiento) desembocaba en fracaso. Tras múltiples ensayos, definí la preparación como sigue: tres gramos de betún disueltos en 15 mililitros de aceite de lavanda, utilización de esta disolución al cabo de cuatro o cinco días, secado a 90 °C durante 20 minutos. El espesor de la película extendida era el único parámetro sobre el que se podía actuar: adquirida la necesaria destreza, las experiencias fueron reproductibles.

La heliografía recuperada

Con el propósito de aproximarme más a los trabajos de Niépce, me dirigí al emplazamiento de las minas de betún del Ain, de las que Niépce se había surtido. Aunque hacía mucho que habían dejado de explotarse, localicé estas minas gracias a los más ancianos de la región, y extraje algunos kilos de caliza impregnada de betún. Efectué la extracción del betún en el laboratorio. Mediante lámparas de flujo luminoso controlado puse de manifiesto los efectos de variación de la solubilidad, pues tal era el verdadero principio de la heliografía. En efecto, el primer resultado interesante consistió en demostrar que el betún no cambia de color a efectos de la luz, sino que se insolubiliza más o menos en función de la intensidad de luz recibida. Se había redescubierto el principio de la heliografía.

Paralelamente, el tiempo de exposición resultaba ser mucho más largo que las ocho horas anunciadas en la bibliografía. Tuve que esperar cinco días para obtener una imagen en una cámara fotográfica equipada con un objetivo igual de luminoso que el de Niépce. Este, curiosamente, no menciona jamás el tiempo de exposición en ninguno de sus escritos. Pero en 1824 le explicaba a su hermano: *He realizado* [...] *un nuevo punto de vista del Gras, sobre mi otra gran piedra, y he recomenzado mis dos puntos de vista, sobre piedra y sobre vidrio, del lado del gallinero. Los dos primeros estarán listos el próximo sábado, y el que va sobre vidrio, que ha sido puesto más tarde, el lunes por la tarde.* Esta carta la escribió el jueves precedente. Sólo la práctica, es decir, la realización de imágenes sobre piedras litográficas o sobre vidrio, permite explicar el pasaje en cuestión y afirmar que el tiempo de exposición para la imagen sobre vidrio mencionada por Niépce era de cinco días.

Las imágenes, ya desde los primeros resultados, mostraron una definición muy alta, así como un excelente degradado de tintas que no cabía prever a la vista de la única imagen de Niépce conocida (*figura 2*). Saltaba a la vista, además, que la imagen al betún de Judea era negativa, en lugar de ser directamente positiva, como se creía. Ahora bien, Niépce no podía darse por satisfecho con un negativo, como dan testimonio todos sus esfuerzos por invertir la imagen (grabado al ácido sobre cobre entre 1822 y 1827 y tratamiento con vapores de yodo a partir de 1828).

No obstante, una frase de la *Notice* alusiva a esta imagen negativa excitaba mi curiosidad: *Una cosa cierta es que, después del lavado, siempre que la impresión esté bien seca, el resultado obtenido ya es satisfactorio.* ¿Cómo podría resultar satisfactoria una imagen negativa? Lo mismo que antes, sólo la experiencia permite interpretar esta frase: en el curso de un ensayo, apareció una imagen negativa en betún de Judea que parecía ser unas veces positiva y otras negativa, según el ángulo en que se observaba. La imagen habíase obtenido por subexposición, y por ello, el barniz, atacado por el disolvente, quedaba mate, sin brillo. Era sólo el soporte, perfectamente pulido, el que devolvía, ora la luz, ora la sombra, y este reflejo, según su intensidad, hacía parecer al barniz más oscuro o más claro, de donde resultaba una imagen negativa o positiva que satisfacía a Niépce.

Niépce había observado y sacado partido del efecto negativo/positivo. Un escrito de 1824 lo confirma: *Como tal contraprueba no está apenas coloreada, no podemos juzgar bien el efecto sino examinando la piedra oblicuamente; es entonces cuando se vuelve perceptible al ojo, gracias a las sombras y los reflejos de luz.* Y añadía: *Y este efecto, puedo asegurárselo, querido amigo, tiene algo de mágico.*

El conocimiento de este tipo de imágenes me permitió, durante una estancia en Austin en 1990, explicar cómo se realizó la placa de Niépce. Se trata de una imagen sobre estaño blanco

puro, brillante como un espejo (el estaño blanco no se oxida al aire). Niépce se detuvo en la imagen de betún, sin tratamiento ulterior, porque también en este caso se trata de un negativo, visible en positivo bajo una iluminación oblicua. Por vez primera se comprendía cómo se había preparado la placa, y era posible datarla.

Niépce tropezó con dificultades para grabar al ácido sus *puntos de vista*: la presencia de barniz sobre toda la superficie, que permitía la reproducción de las medias tintas, impedía que el ácido alcanzase el metal, según han demostrado los experimentos de laboratorio. Intenté entonces hacer el barniz lo más delgado posible, en detrimento de la riqueza de las medias tintas. Cuando la capa de barniz fue extremadamente delgada obtuve imágenes en las que el ácido, atravesando el barniz, grababa el metal en una multitud de puntos. Comprendí de inmediato que estaba observando el efecto de "arena" que Niépce menciona en las cartas que intercambia con el grabador-impresor cuando puso a punto la invención del fotograbado de trazos.

El Physautotype

La reconstrucción de experiencias da sus frutos: me permite redescubrir el *Physautotype* inventado por la asociación Niépce-Daguerre, procedimiento que ha permanecido desconocido hasta la fecha, y cuya base es el residuo de la esencia de lavanda. Daguerre, en 1830, está intrigado por el residuo que obtiene tras la destilación de la esencia de lavanda. Comenta la destilación de la esencia de lavanda en una carta a Niépce, en febrero de 1830. En lenguaje cifrado, ciertas palabras son reemplazadas por números, y las que aparecen entre paréntesis han sido añadidos a lápiz por Niépce: *Pero he aquí el gran punto para la prontitud. Ocurre completamente lo mismo con el 53* (destilación) *que con el 14* (día). *Lo que queda en 53* (la destilación) *después de 55* (evaporación) *es inatacable por el 21* (disolvente). *Las partes que reciben el 14* (día) *facilita* [*sic*] *el 55* (evaporación). *Lo que queda en la plancha es asimismo inatacable por el 21* (disolvente). *Así pues, el 14* (día) *parece actuar como el 24* (fuego), *lo que solamente demuestra que el mismo principio, el que opera, se encuentra en estas dos acciones.*

¿Cómo comprender tales textos? Las cartas de Daguerre están repletas de ellos. Sólo hay un medio: rehacer el experimento. En el curso de la destilación, la esencia de lavanda, que inicialmente es de color amarillo claro, se vuelve cada vez más oscura, hasta volverse marrón. Al final no queda más que un alquitrán sólido de color marrón-negruzco. Tal color marrón no se podía conocer de antemano, porque Arago había declarado en 1839 que el residuo era un producto interesante *a causa de su mayor blancura*. Comprendí, al reconstruir el procedimiento, que el residuo en solución alcohólica, una vez extendido sobre el soporte, produce una capa de color blanco, que Arago confundía con el color del residuo. De hecho su color es idéntico al del betún. Y aquí es donde todo se aclara. Es en este color donde Daguerre vio analogías con el betún. Comprobó que este residuo no era soluble en los disolventes del betún, es decir, que se encontraba en un estado idéntico al del betún tras la exposición a la luz: pero en aquel caso era el calor el responsable de este estado. Dedujo que la luz y el calor producían el mismo efecto.

No tuvo dificultad en llegar a esta conclusión, porque, en varias ocasiones, Niépce le había señalado tal semejanza de efectos del calor y de la luz. ¡Daguerre llegó incluso a sostener que la luz producía una evaporación! Pensaba, parece ser, que lo que subsistía sobre la placa, tras el efecto de la luz y el decapado era el residuo marrón de la esencia de lavanda obtenido fuera por acción de la luz o del calor. Fue con este mismo residuo con el que los dos asociados pusieron a punto el nuevo procedimiento dos años más tarde.

Notice sur l'héliographie
par
Mr J.N. Niépce.

La découverte que j'ai faite et que je désigne sous le nom d'Héliographie, consiste à reproduire spontanément, par l'action de la lumière, avec les dégradations de teintes du noir au blanc, les images reçues dans la chambre obscure.

principe fondamental de cette découverte.

La lumière, dans son état de composition et de décomposition, agit chimiquement sur les corps. Elle est absorbée, elle se combine avec eux, et leur communique de nouvelles propriétés. Elle augmente la consistance naturelle de quelques uns de ces corps; elle les solidifie même, et les rend plus ou moins insolubles, suivant la durée ou l'intensité de son action. Tel est, en peu de mots, le principe de la découverte.

Matière première. préparation.

La substance, ou matière première que j'emploie, celle qui m'a le mieux réussi, et qui concourt plus immédiatement à la production de l'effet, est l'Asphalte ou Bitume de Judée préparé de la manière suivante:
je remplis à moitié, un verre de ce Bitume pulvérisé.

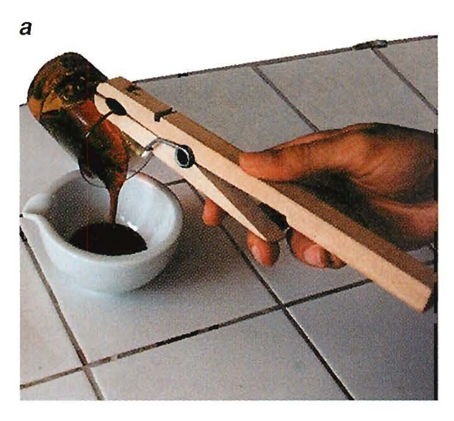
Primera página de la *Notice sur l'héliographie* de Niépce, redactada en 1829 para Daguerre, al objeto de establecer su asociación.

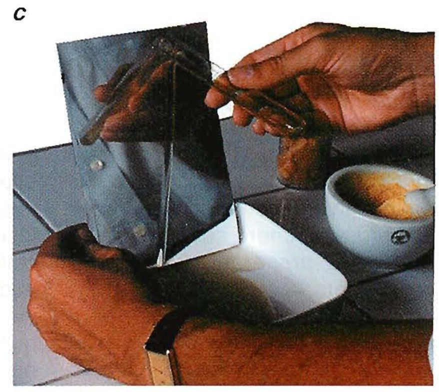
La explicación del malentendido

El redescubrimiento de esta segunda técnica o *physautotype* contradice lo que se había escrito sobre la colaboración Niépce /Daguerre, indebidamente calificada de estéril. Por el contrario, parece ahora que tal colaboración había funcionado bien y dado fruto. Se inventó un segundo procedimiento, y el tiempo de exposición se redujo. Las imágenes eran directamente positivas en una sola operación de revelado, lo que constituía el objetivo deseado desde el principio de la asociación.

Un segundo resultado importante consistió en descubrir que las imágenes obtenidas se prestan a ser confundidas con daguerrotipos, es decir, con las imágenes que Daguerre producirá por el procedimiento que inventará en 1839, después de la muerte de Niépce, inspirándose en los trabajos de la colaboración. Comprendemos ahora por qué se produjo una polémica entre la familia de Niépce y Daguerre cuando éste divulga en 1839 el procedimiento que lleva su nombre. En efecto, Daguerre muestra imágenes, los daguerrotipos, cuyo aspecto era idéntico a los que la familia de Niépce había visto realizar durante la asociación. Era lógico que proclamase el robo del invento de Niépce, lo que no era completamente falso, porque si bien es cierto que los procedimientos eran diferentes, no es menos cierto que Daguerre tomó numerosos aspectos de los trabajos de Niépce para poner a punto su invento.

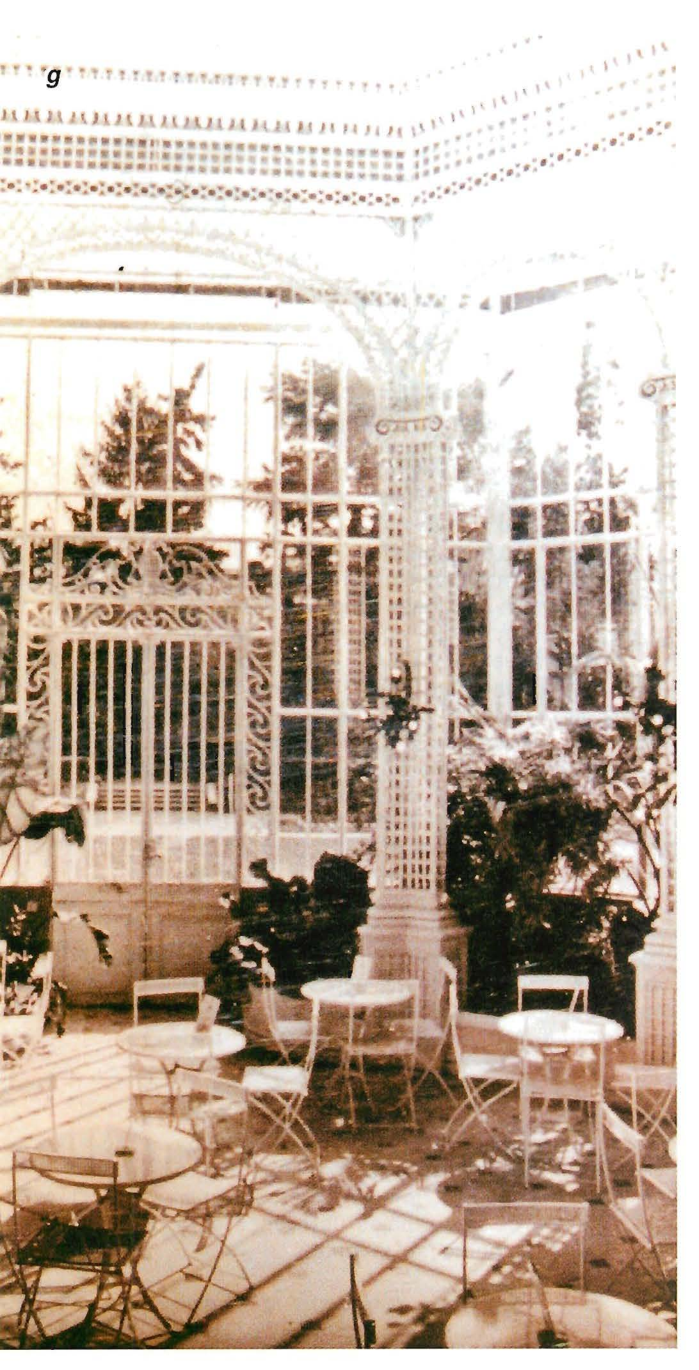
JEAN-LOUIS MARIGNIER





a b c

6. RECONSTRUCCION DE UN *PHYSAUTOTYPE* por el método de Niépce y Daguerre. Tras mantener en fusión una resina de pino durante varias horas a 200 grados centígrados, es vertida en un mortero (*a*) para pulverizarla una vez fría; después se disuelven en alcohol algunos miligramos del polvo obtenido (*b*). La placa de plata soporte se baña, a continuación, con la disolución amarilla obtenida (*c*). Tras la evaporación del alcohol, la placa queda cubierta con un de-



g

tal plateado pulido, sometiendo después el negativo a la acción de vapores de yodo, corrosivos. Donde el metal ha quedado desnudo se forma rápidamente una capa de yoduro de plata; bajo la luz, el yoduro se transforma en partículas microscópicas de plata metálica, de aspecto negro a simple vista. Tras la eliminación con alcohol del barniz residual, la imagen es un positivo.

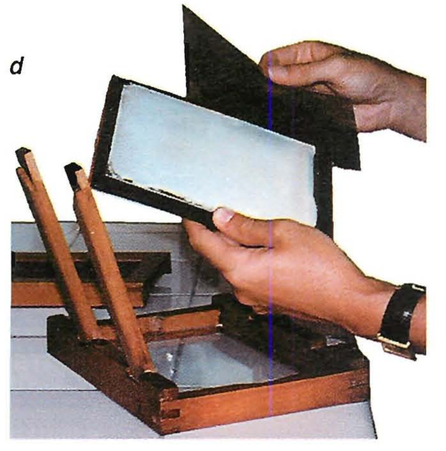
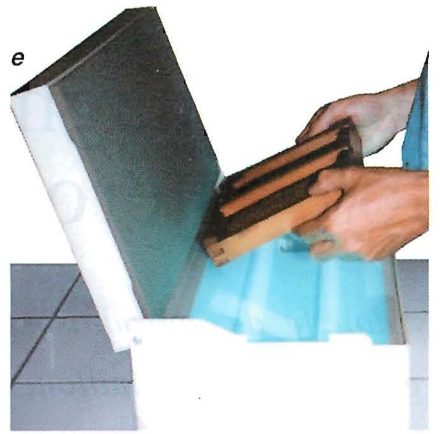
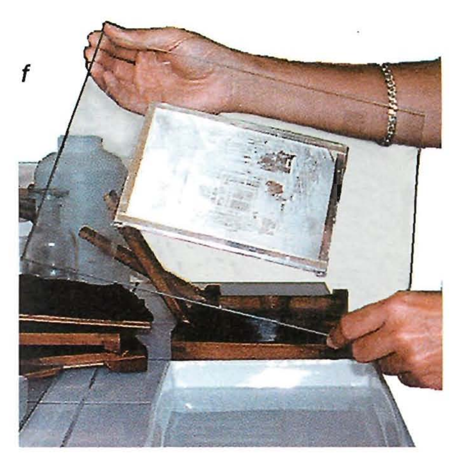
Cuando reprodujimos este procedimiento, no pudimos sino sentirnos maravillados por la calidad y la resolución de la imagen, comparable a la de las mejores fotografías actuales. En efecto, el yodo gaseoso, además de su acción sobre el metal desnudo, se difunde a través del barniz (no así el ácido) en un tiempo proporcional al espesor de éste. El contraste y la densidad del positivo dependen, en consecuencia, de la duración de la exposición al yodo. Recuérdese que el yodo había sido descubierto en 1811 por Courtois y que su acción sobre la plata había sido estudiada algunos años después por Gay-Lussac: Nicéphore seguía atento los avances de la química.

En 1829 el inventor puede estimar cumplido el programa que se había fijado en 1816. Su invento está maduro y listo para su publicación. Tras trece años de trabajo tenaz, cabe dar el difícil paso de la ciencia "particular" a la ciencia "pública". En este ambicioso diseño, Nicéphore Niépce se asocia con Louis-Jacques-Mandé Daguerre (1787-1851), 22 años más joven que él.

Antes de evocar los logros de esta colaboración resulta interesante volver, en función de la físico-química actual, sobre las transformaciones químicas que experimenta el betún de Judea. La molécula fotosensible de este compuesto es el asfalteno. Estas moléculas poseen una estructura aromática plana rodeada por cadenas alifáticas y se disponen de forma natural en un apilamiento paralelo. ¿Qué les sucede bajo la influencia de la luz? Se admite que las estructuras planares se ligan entre sí en una medida que depende de la intensidad de la luz recibida (reticulación por fotooxidación). Dado que la acción de los fotones es local, la resolución es excelente. El espesor de la película fotosensible tras el decapado varía con las gradaciones de claroscuro, formando la imagen.

La sensibilidad, por el contrario, es muy pequeña. Niépce no indicó con precisión el tiempo de exposición necesario para obtener sus "puntos de vista". Los experimentos muestran que eran del orden de 40 a 60

JEAN-LOUIS MARIGNIER y MICHEL ELLENBERGER comparten una misma afición por la historia de la fotografía. Marignier, funcionario del CNRS, se halla adscrito al laboratorio de físico-química de las radiaciones de la Universidad de París-sur. Ellenberger, tras su paso por la investigación en el campo de la bioquímica, se dedica a la divulgación científica.

pósito de resina blanca (*d*). Aquí deseamos obtener una diapositiva de gran formato por contacto (*e*) con la placa (tiempo de exposición de la copia por contacto: 10 minutos). Tras la exposición, la imagen, invisible todavía, se coloca sobre una cubeta que contiene petróleo blanco (*f*). Por acción de los vapores de petróleo, la imagen (el palmario de los jardines Albert Kahn, en Boulogne) aparece y es fijada (*g*). (Fotografías cedidas por *Pour la Science* y Louis Marignier.)

horas para un paisaje con tiempo soleado, ¡lo que corresponde a una sensibilidad de 10^{-6} ISO! (Las películas fotográficas actuales tienen una sensibilidad de 100 ISO.)

Asociados por contrato el 14 de diciembre de 1829, Niépce y Daguerre se fijan dos objetivos: *1*) obtener directamente una imagen positiva, sin pasar por un negativo, y *2*) abreviar el tiempo de exposición, lo que ellos denominan "la prontitud."

La asociación con Daguerre

Niépce transmite a Daguerre su pasión por la química. A lo largo de cuatro años, hasta la muerte de Niépce, Daguerre permanece, en cuatro ocasiones y a veces hasta dos semanas, en Saint-Loup-de-Varennes, para trabajar de la mañana a la noche en experimentos conjuntos. En el ínterin, Niépce y Daguerre se comunican por carta y las de Daguerre se han conservado. Un largo trabajo de análisis ha permitido recomponer por vez primera los trabajos de los dos socios y reproducirlos en laboratorio.

En dos años y medio logran poner a punto un nuevo procedimiento fotográfico que Niépce denomina *physautotype* (neologismo culto griego que significa "imagen de la naturaleza por sí misma"). La delgada película fotosensible está constituida por resinas o residuos de la destilación de la esencia de lavanda; se la extiende sobre un placa de metal plateado. Tras la exposición en cámara oscura, la placa se revela con vapor de petróleo blanco (las razones físico-químicas de estos fenómenos no se han elucidado aún por completo). Observada con iluminación oblicua, la imagen obtenida es positiva. La resolución es excelente; los matices, bien conseguidos. El tiempo de exposición ha quedado reducido a una jornada, e incluso a tres o cuatro horas para objetos cercanos.

Niépce y Daguerre saben que están a punto de alcanzar la meta. Pero Daguerre insiste en no divulgar su invento antes de haber logrado el objetivo: un tiempo de exposición de un cuarto de hora a lo sumo. *En el estado en que se encuentran las artes en el presente es imperativo no llegar a medias, porque el menor perfeccionamiento que se aporte a un descubrimiento hace con frecuencia olvidar a su primer autor*, le había escrito ya a Niépce, el 12 de octubre de 1829. ¡Bien se verá cuán pertinente es tal observación!

Tras la muerte de Niépce, Daguerre prosigue en solitario las investigaciones que culminarán en el daguerrotipo, imagen obtenida mediante el yoduro de plata, merced, fundamentalmente, a dos operaciones: la primera, utilizando un revelador (el vapor de mercurio) y la segunda, un fijador (cloruro de sodio).

Daguerre se percata —y es su idea genial— de que el invento precisa de una consagración científica oficial. Su visita a François Arago, secretario perpetuo de la Academia de Ciencias y personaje político, iba a ser decisiva para el futuro de la fotografía. El invento será presentado en el curso de la sesión solemne del Instituto, el 19 de agosto de 1839. El Estado se proclama propietario del descubrimiento, con el fin de *proveer liberalmente* [de él] *al mundo entero*. A Daguerre e Isidore Niépce, heredero de su padre, se les otorgan pensiones vitalicias. Pero el descubrimiento debía ir acompañado de un mensaje sencillo: un único inventor. En el folleto de presentación de 1839, el texto de la *Notice* de Niépce está salpicado de comentarios críticos de Daguerre, que carecen de fundamento. El examen de los documentos permite ver en ellos la influencia de Arago: para imponerse, parece pensar Arago, un inventor debe realzar su propio papel y minusvalorar el de sus predecesores. Por otra parte, las investigaciones de otro francés contemporáneo, Hippolyte Bayard, son cubiertas bajo un manto de silencio.

Las peripecias que acompañan al "nacimiento oficial" de la fotografía y su triunfo actual vuelven a arrojar luz sobre la obra del pionero: Niépce, inventor de la fotografía, dio el primer paso hacia la revolución de las imágenes. Y hay más: el ordenador, este otro símbolo de la modernidad, debe mucho al fotograbado, cuyo inventor fue, también, Niépce.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

À LA DÉCOUVERTE DES HÉLIOGRAPHIES DE NIÉPCE. J. L. Marignier, *Le Photographe*, n.º 1470, pág. 13, 1989.

MYSTÈRES ÉCLAIRCIS DE LA PLUS ANCIENNE PHOTO DU MONDE. J. L. Marignier, *Le Photographe*, n.º 1480, pág. 50, 1989.

PREMIÈRE RECONSTITUTION DU DEUXIÈME PROCEDÉ PHOTOGRAPHIQUE AU MONDE. J. L. Marignier, *Le Photographe*, n.º 1499, pág. 26, 1992.

DÉCOUVERTE DE L'INVENTION PAR NIÉPCE ET DAGUERRE D'UN PROCEDÉ PHOTOGRAPHIQUE À BASE DE COLOPHANE. J. L. Marignier, *Le Photographe*, n.º 1524, pág. 36, 1995.

PHOTOCHEMISTRY OF ASPHALTENE FILMS. A STUDY OF THE WORLD'S FIRST PHOTOGRAPHIC PROCESS AND ITS INVENTION. J. L. Marignier, en *J. Imag. Sci.* n.º 40, pág. 123, 1996.

Actividad magmática en los asteroides

Los meteoritos ígneos dan fe de episodios magmáticos ocurridos en los asteroides hace más de 4500 millones de años y aportan una valiosa información sobre el origen y evolución del sistema solar

Ignacio Casanova y Jordi Llorca

De las más de diez mil toneladas de material extraterrestre que caen anualmente en nuestro planeta, sólo una pequeña fracción logra atravesar la atmósfera sin reducirse a polvo. Hablamos de los meteoritos.

Desde hace unos cuarenta años, el estudio de los meteoritos ha venido proporcionando el grueso de la información de que hoy disponemos sobre el origen y evolución del sistema solar, la Tierra incluida. Por eso, estas rocas, formadas hace unos 4600 millones de años, merecen que se les reconozca como verdaderas joyas científicas, cuyo valor aumenta conforme el advenimiento de nuevas técnicas de investigación posibilitan un estudio más detenido. Se cree que el sistema solar nació del colapso gravitatorio de una nube de gas y polvo interestelares, la nebulosa solar, hace más de 4600 millones de años. Durante el proceso de contracción, se formó un primitivo Sol en el centro de la nebulosa y, gracias al movimiento de rotación de la misma, un disco de materia en el plano ecuatorial a partir del cual surgieron pequeños aglomerados sólidos, o planetésimos, por acreción gravitatoria. La subsiguiente evolución de los planetésimos resultó en la formación de los planetas y demás cuerpos actuales del sistema solar.

Aunque contienen minerales que no se encuentran en las zonas accesibles de nuestro planeta, la mayoría de los componentes que integran los meteoritos los comparten con muchas rocas terrestres. Los metales predominantes en los meteoritos son las aleaciones de hierro-níquel y, entre los silicatos, abundan el olivino y los piroxenos. De acuerdo con las proporciones relativas de metal y silicatos que posean, las rocas meteoríticas se amparan en tres grandes grupos: sideritas, litosideritas y lititas.

En las sideritas, o meteoritos metálicos, los componentes dominantes son los metales. Las litosideritas (o siderolitas) son meteoritos formados por proporciones similares de metal y silicatos; por fin, las lititas (los aerolitos de antaño) portan una cuantía superior de materiales silicatados. Atendiendo a sus características texturales y composición química, cada grupo puede subdividirse, a su vez, en otros.

En su mayoría, los meteoritos provienen del cinturón de asteroides, situado entre las órbitas de Marte y Júpiter. Hay en esa franja un gran número de planetoides, cuyo tamaño oscila desde el de un grano de polvo hasta varios centenares de kilómetros de radio. Con dimensiones tan reducidas, esos cuerpos asteroideos apenas si han podido desarrollar una actividad geológica reseñable, razón por la cual conservan bastante bien los rasgos primordiales del material que formó los planetas —más evolucionados— durante los primeros millones de años del sistema solar. Con todo, pese a su carácter primitivo, muchos meteoritos tienen características de tipo petrológico y químico que ponen de manifiesto la ubicuidad de los procesos ígneos en los planetésimos donde nacieron.

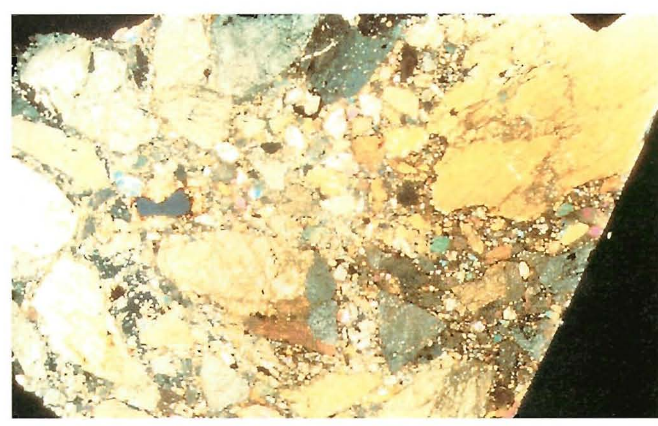
Entre los procesos aludidos sobresale el de la diferenciación magmática. Llámase así el proceso en virtud del cual un magma se separa en porciones química y mineralógicamente diferentes, que suelen evolucionar cada una por su lado. En general, los procesos de diferenciación magmática que se produzcan en los asteroides resultarán menos eficientes que los ocurridos en la Luna, la Tierra u otros cuerpos mayores. La razón hay que buscarla en su menor capacidad de retención de calor y pequeño campo gravitatorio.

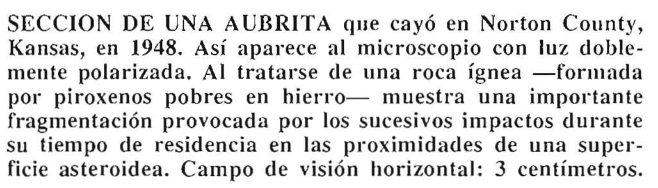
Sabido es que el magma se origina a partir de la fusión parcial de un protolito. En la Tierra y la Luna, este protolito procede, a su vez, de episodios anteriores de actividad magmática. Pero en los asteroides ígneos, donde la duración del calentamiento ha sido corta por lo general, la fusión afecta a materiales nada o poco evolucionados. El grado de fusión que experimentarán dichos cuerpos primitivos puede variar y originar diferentes tipos de magma. En principio, el porcentaje de fusión necesario para iniciar la migración del fundido depende de la intensidad del campo gra-

IGNACIO CASANOVA y JORDI LLORCA estudian, desde enfoques complementarios, los cuerpos celestes. Casanova, que se formó en la Universidad de Nuevo México, ha desarrollado gran parte de su labor investigadora en el Centro Espacial Johnson y la Universidad de Chicago. En la actualidad se halla adscrito a la Universidad Politécnica de Cataluña, dedicado a la elaboración de modelos numéricos, estudio de los planetas interiores y meteoritos y evaluación de recursos naturales extraterrestres. Llorca se doctoró en química por la Universidad de Barcelona, donde ejerce labores docentes. Sus líneas principales de investigación incluyen el estudio de reacciones catalíticas y su papel en la formación de moléculas orgánicas complejas en meteoritos y cometas.

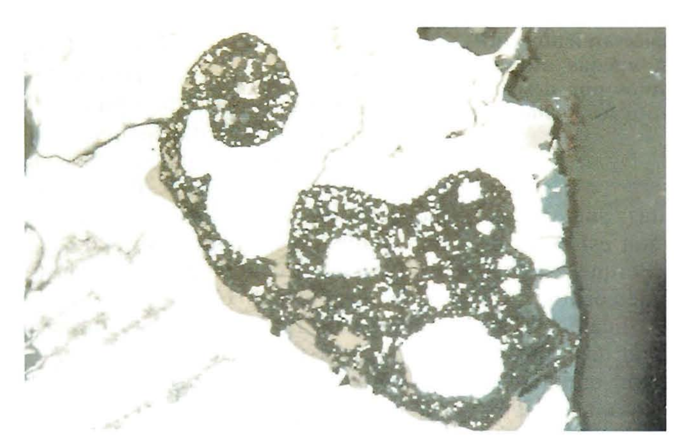


CONDRULOS DEL METEORITO DE BJURBÖLE, que cayó en Borga, Finlandia, en 1899. Son los objetos esferoidales de la micrografía. Se formaron por fusión y rápido enfriamiento de materiales de grano fino en la nebulosa solar primitiva. En el centro, cóndrulo barrado de olivino; a la izquierda, cóndrulo porfídico de olivino y piroxeno en una matriz de grano muy fino de composición feldespática. Obsérvese el contacto indentado entre ambos objetos, que indica que se encontraban aún en estado semifundido en el momento en que entraron en contacto. Campo de visión horizontal: 2,5 milímetros, aproximadamente.





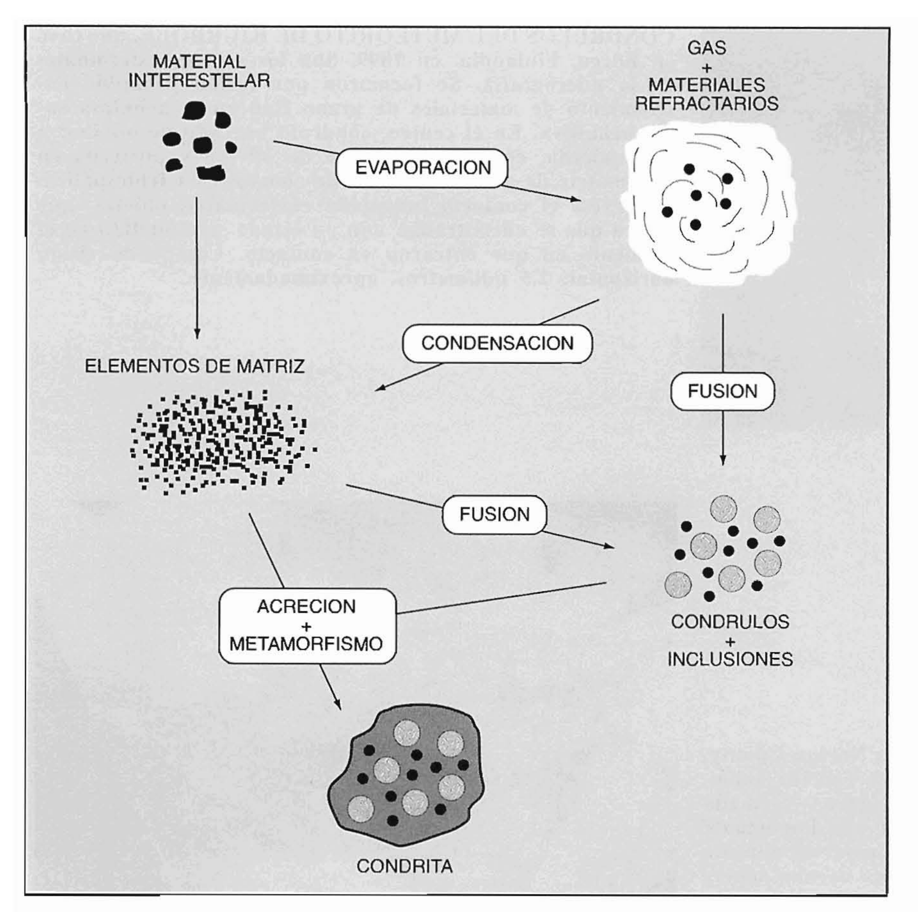
SECCION DE UNA AUBRITA que cayó en Norton County, Kansas, en 1948. Así aparece al microscopio con luz doblemente polarizada. Al tratarse de una roca ígnea —formada por piroxenos pobres en hierro— muestra una importante fragmentación provocada por los sucesivos impactos durante su tiempo de residencia en las proximidades de una superficie asteroidea. Campo de visión horizontal: 3 centímetros.



SECCION DEL METEORITO DE TECHADO, que se recuperó en Nuevo México, en 1977. En él podemos observar una inclusión de carácter condrítico (objeto irregular), de unos 1,5 cm de elongación máxima, en una matriz metálica. La distribución de la troilita —sulfuro de hierro de color marrón que aparece a modo de "gotitas" en los bordes de la inclusión— da a entender que se segregó desde el interior del objeto a temperaturas que no superaron los 1000 ºC. Esta inclusión es el único objeto de su clase identificado hasta la fecha que aporta una prueba directa de la vinculación de las condritas de tipo H con las sideritas de la clase IIE.



SECCION DEL METEORITO METALICO DE TOLUCA, hallado en Xiquipilco, México, en 1776. En él se ponen de manifiesto la estructura de Widmanstätten (bandas orientadas) y algunos nódulos de grafito (inclusiones de color oscuro) con bordes discontinuos de schreibersita (fosfuro de hierro-níquel, de color amarillento). El grano pseudo-triangular que se observa en la inclusión mayor es de troilita. La muestra tiene aproximadamente 15 cm de longitud.



1. PROCESOS PRINCIPALES en virtud de los cuales se originaron los precursores de los materiales que conformaron el sistema solar, hace unos 4600 millones de años. Las condritas —resultado final de tales procesos— incorporan componentes de fuentes diversas y distintos grados de procesamiento; incluyen desde pequeñas cantidades de materia interestelar sin apenas alterar desde su origen en atmósferas estelares, hasta materiales fundidos por descargas eléctricas u otros fenómenos rápidos de alta energía durante los primeros estadios evolutivos del sistema solar.

vitatorio; así, los asteroides más pequeños requieren un mayor grado de fusión que los mayores para que se produzca una auténtica diferenciación. La cantidad de fundido generado antes de la migración de los magmas depende también de las propiedades de la región fuente, en particular de su textura y composición.

De ambas condiciones se desprende que los fundidos primarios producidos en el interior de los asteroides han sufrido un menor grado de diferenciación que los magmas de los cuerpos planetarios. Además, la ausencia de altas presiones en el interior de los asteroides impide la participación del granate y minerales parecidos en los procesos de cristalización, lo que también conduce a menores grados de fraccionamiento.

Entre los productos de la actividad ígnea de los asteroides podemos identificar varios grupos de meteoritos magmáticos. Los meteoritos que no han sufrido ninguna evolución ígnea se llaman condritas; suelen contener cóndrulos, que son esférulas de olivino y piroxeno. Porque carecen de cóndrulos, a los meteoritos diferenciados y ricos en silicatos se les denomina también acondritas, que, en razón de su composición mineral, se clasifican a su vez en cinco tipos: eucritas, diogenitas, howarditas, aubritas y ureilitas.

En la Tierra, la fusión parcial de los materiales del manto da lugar a la formación de basaltos, rocas volcánicas con proporciones aproximadamente iguales de plagioclasa y piroxeno. Por su parte, las eucritas son meteoritos también basálticos.

El manto terrestre consta sobre todo de rocas ultramáficas, rocas con alto contenido de minerales máficos (magnesio y hierro), como el olivino y, en menor medida, el piroxeno. Las diogenitas son acondritas de naturaleza ultramáfica. En un principio, se creyó que este grupo de meteoritos representaban materiales del manto de un asteroide, pero hoy tiende a creerse que tales rocas ígneas meteoríticas podrían acumularse en ambientes mucho más restringidos; por ejemplo, en lagos de material fundido por impactos.

Pese a su naturaleza ígnea, la mayoría de eucritas y diogenitas son rocas brechoides, es decir, formadas a partir de fragmentos de otras preexistentes. Dado que los fragmentos de las brechas eucríticas y diogeníticas comparten un mismo origen, tales brechas se denominan monomícticas. Por contra, las howarditas son brechas polimícticas, integradas por clastos de materiales eucríticos y diogeníticos.

Las aubritas están constituidas casi en su totalidad por enstatita prácticamente pura (un piroxeno magnesiano). Dichas acondritas son de naturaleza brechoide, y están compuestas por asociaciones de cúmulos de enstatita. Las aubritas proceden de al menos dos asteroides distintos que se formaron en las proximidades de los cuerpos progenitores de las condritas de enstatita, tal y como sugieren sus composiciones isotópicas del oxígeno y parecido mineralógico.

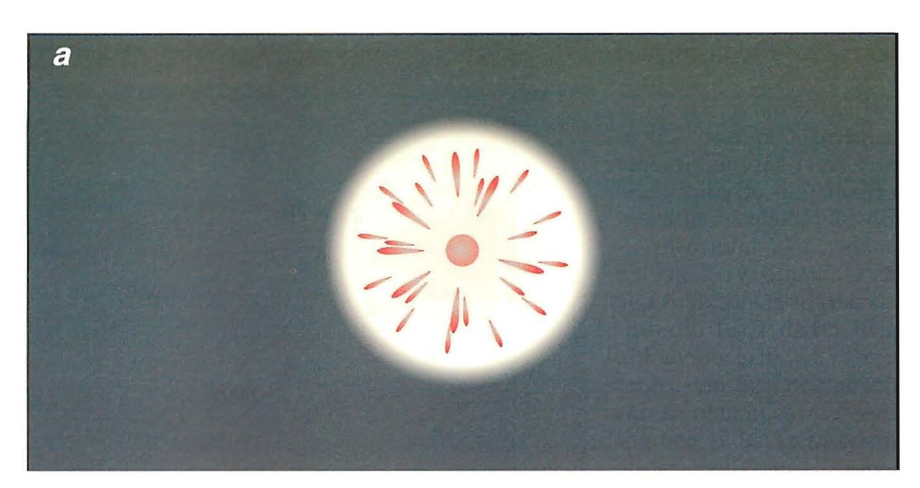
Las ureilitas son cúmulos de olivino y pigeonita, ricos en carbono, que probablemente se formaron como consecuencia de la fusión parcial de un asteroide carbonáceo. Tienen un origen complejo que indica procesos de fusión parcial, cristalización fraccionada acompañada por formación de pequeñas cantidades de hierro metálico en condiciones de fusión muy reductoras, alteración del líquido intersticial (intercumulus) a causa de la mezcla con otro magma diferente, y cristalización rápida. Durante la cristalización fraccionada, la composición del líquido magmático varía de manera más o menos continua debido a la segregación de los sólidos que se van formando, mientras que en un proceso de cristalización rápida tal segregación no se produce de un modo eficiente. Posiblemente, las ureilitas constituyen las muestras de material meteorítico diferenciado más complejo y difícil de entender, debido a la intrincada evolución de los procesos magmáticos que sufren los materiales carbonosos y la subsiguiente dificultad de reproducirla en el laboratorio.

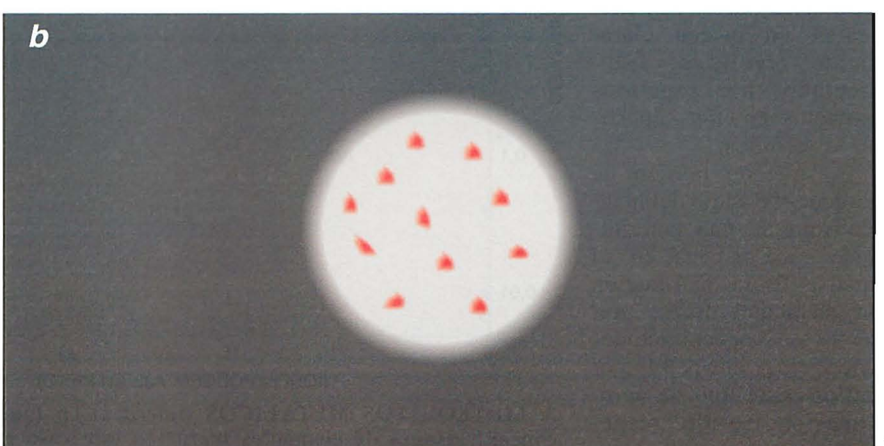
Entre los meteoritos de origen magmático, los más singulares son los que abundan en metal, es decir, sideritas y litosideritas. Las sideritas son rocas metálicas formadas en la ma-

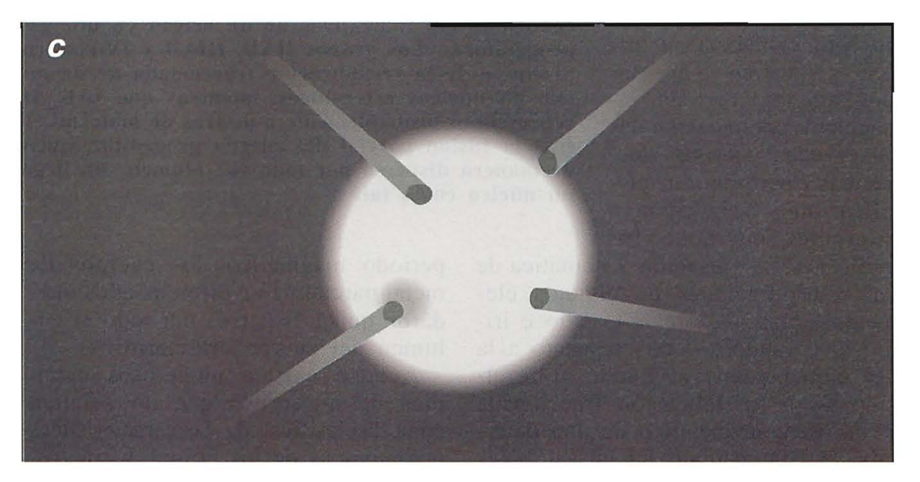
yoría de los casos por más del 90 % de aleaciones de hierro-níquel. Dichas aleaciones suelen presentarse a través de dos minerales: la kamacita, pobre en níquel —generalmente menos del 6 %— con una celda cúbica centrada en el interior, y la taenita, rica en níquel, con una estructura cristalina cúbica centrada en las caras.

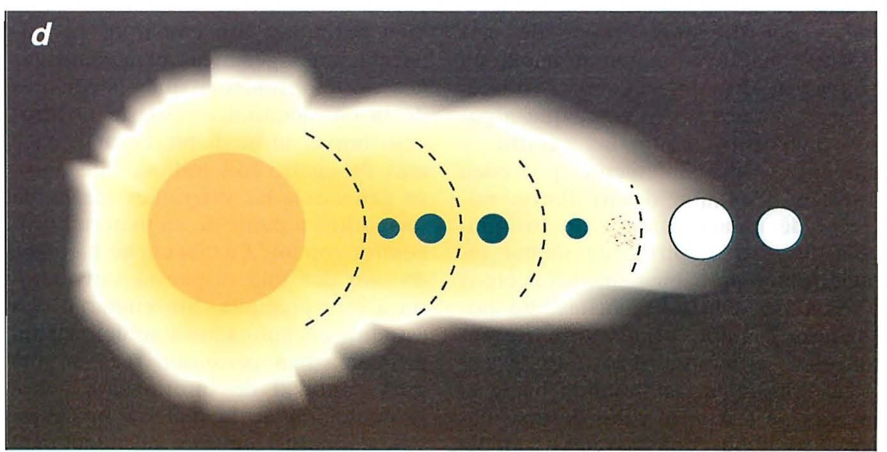
Atendiendo a la presencia o ausencia de la estructura de Widmanstätten (un intercrecimiento muy característico de kamacita y taenita, que se desarrolla por enfriamiento lento del sólido metálico, a temperaturas entre aproximadamente 700 y 350 grados centígrados), las sideritas se clasifican tradicionalmente en tres grandes grupos: octahedritas, hexahedritas y ataxitas. Las octahedritas, el tipo más común, muestran una estructura de Widmanstätten bien configurada. Las hexahedritas son cristales que constan exclusivamente de kamacita; carecen, pues, de estructura de Widmanstätten. Debido a su elevado contenido en níquel, las ataxitas desarrollan intercrecimientos discontinuos de pequeños cristales aciculares de un compuesto denominado plesita (mezcla inhomogénea de aleaciones de hierro-níquel), inmersos en una matriz de taenita. Por otro lado, las variaciones en concentraciones de algunos elementos traza observadas en las sideritas han permitido subdividir esta categoría de meteoritos metálicos en 13 grupos químicos diferentes, aunque aún existen unos 70 meteoritos de esta clase de rocas magmáticas que no se pueden encuadrar dentro del esquema taxonómico tradicional.

En el caso de las litosideritas, los criterios de clasificación de tipo químico revisten cierta complejidad, debido a la diferente naturaleza mineralógica de sus componentes principales, metal y silicatos. Por esta razón, hoy se adopta un método basado en el tipo de silicato que con-





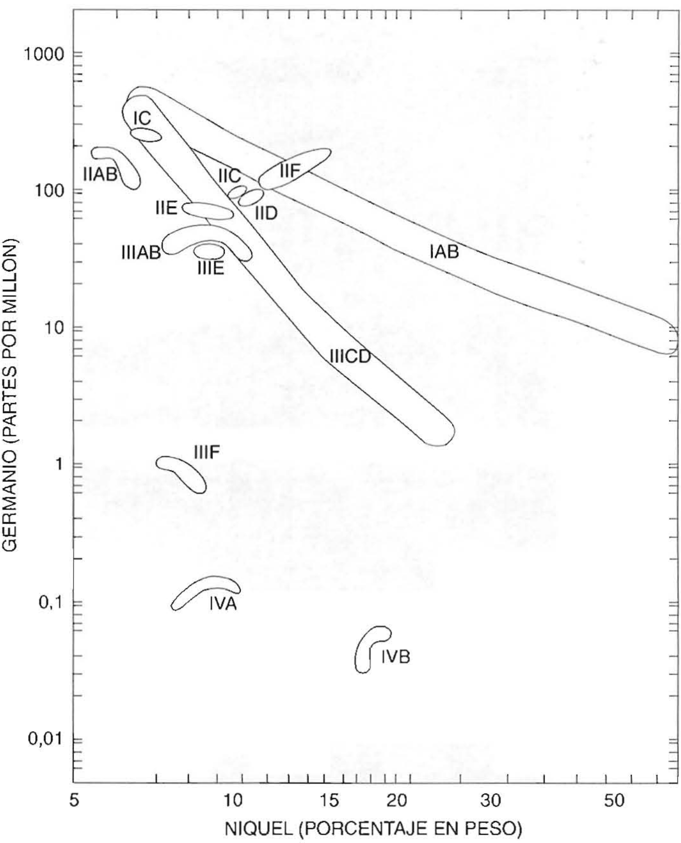




2. EN ALGUN MOMENTO de su evolución, algunos asteroides, al igual que los planetas interiores del sistema solar, sufrieron procesos de diferenciación ígnea. La energía térmica que dio lugar a estos procesos pudo tener diversos orígenes: la transformación de energía potencial gravitatoria en calor durante la segregación de un núcleo metálico (*a*), la desintegración radiactiva de isótopos inestables de vida corta, como el aluminio-26 (*b*), los impactos con otros cuerpos asteroideos (*c*) y la radiación electromagnética del Sol primitivo durante una fase T-Tauri (*d*).

tienen, y así se distinguen entre pallasitas y mesosideritas. Caracteriza a las primeras una fase silicatada casi esencialmente formada por olivino; suele considerárseles representantes de la interfase entre el manto y el núcleo de cuerpos asteroideos que puedan haber sufrido procesos de diferenciación magmática. Las mesosideritas corresponden a las litosideritas cuyo componente no-metálico es de naturaleza basáltica y presentan un origen claramente regolítico, fragmentado, por repetidos impactos en una superficie asteroidea.

Un método clásico de abordar el estudio del magmatismo de una determinada roca estriba en el análisis de la distribución de elementos traza, presentes en concentraciones inferiores a mil partes por millón. Este tipo de aproximación resulta especialmente eficaz en el caso de las sideritas, ya que no sólo evidencia su origen magmático —necesario para explicar las variaciones composicionales observadas —sino que, además, permite su clasificación y asignación a diferentes cuerpos progenitores. La variación sistemática de las concentraciones de algunos elementos traza —germanio, galio e iridio, por ejemplo— con respecto a la del níquel puede atribuirse al resultado de la cristalización fraccionada de un magma metálico de una determinada composición inicial.



3. METEORITOS METALICOS (*sideritas*) en función de sus concentraciones de elementos traza (en este caso germanio) y níquel. Las distintas tendencias mostradas por los 13 grupos conocidos son indicativas de un origen en diferentes cuerpos progenitores. Los grupos IIAB, IIIAB y IVA se consideran el producto de la cristalización fraccionada de un magma metálico en núcleos asteroideos, mientras que IAB, IIICD y IIE representan probablemente muestras de material metálico que, tras la fusión parcial del cuerpo progenitor, quedó atrapado de manera dispersa por todo su volumen, sin llegar a formar un núcleo como tal.

Así, las diferentes tendencias mostradas por distintos grupos de meteoritos metálicos apuntan hacia un origen en diferentes cuerpos progenitores. Vemos, en efecto, que algunos meteoritos, como las eucritas y diogenitas, probablemente procedan de asteroides que desarrollaron núcleos, de manera análoga a los planetas terrestres; otros, de menor tamaño, como probablemente los cuerpos progenitores de las aubritas, no poseían un campo gravitatorio de intensidad suficiente para que la segregación del metal fundido hacia el interior se llevara a cabo de una manera eficiente, por lo que, tras un período magmático, los cuerpos de metal parcialmente diferenciados quedaron quizá dispersos por todo el volumen del cuerpo originario.

Aunque existen numerosos ejemplos de meteoritos que no admiten cómoda clasificación, las características taxonómicas de los grupos y subgrupos principales de meteoritos están bien definidas. Sin embargo, sus interrelaciones genéticas plantean algunos de los problemas más acuciantes de la cosmoquímica: ¿existe un proceso universal mediante el cual, hace más de cuatro mil millones de años, se generaron las diferentes clases de meteoritos a partir de un material progenitor común? La ciencia no ha podido aún dar una respuesta satisfactoria a esta pregunta. Sin embargo, los estudios encaminados a solucionar tal problema han permitido recabar una gran cantidad de información sobre la evolución de la materia interestelar en nuestro entorno cósmico para dar lugar a la estrella y cuerpos planetarios que hoy conforman nuestro sistema solar.

El estudio de los procesos de diferenciación magmática que tuvieron lugar en muchos asteroides durante su historia primitiva ofrece nuevas vías de investigación sobre la naturaleza de los procesos que transformaron la materia original de nuestro sistema solar. Desde un punto de vista geológico, el magmatismo asteroideo puede abordarse desde diferentes perspectivas: estudio mediante microscopía óptica y técnicas derivadas de la microscopía electrónica de secciones pulidas, análisis geoquímico de la composición de los diversos componentes presentes o las dataciones radiométricas de determinados isótopos de meteoritos de naturaleza ígnea.

La vertiente física del magmatismo asteroideo se ocupa de la identificación de las fuentes de calor que dieron lugar a tal proceso y, por extensión, la evolución térmica que los cuerpos asteroideos pudieron haber seguido en virtud de la naturaleza y duración de los procesos de calentamiento.

No hay unanimidad de criterio sobre las principales fuentes de calor que afectaron a los asteroides, hace más de 4500 millones de años, y posibilitaron el desarrollo de una actividad magmática en su interior y superficie. Podemos agrupar las fuentes de energía térmica de un planetoide en dos grandes categorías: fuentes internas y fuentes externas. Ejemplos de las internas son el calor gravitatorio y la desintegración de elementos radiactivos. Son fuentes externas de energía térmica de un planetoide los impactos con otros asteroides y la radiación solar.

La cantidad de calor gravitatorio que se desprende durante la formación de un planeta es proporcional a la fracción de energía potencial que se retiene en forma de calor, la densidad del cuerpo celeste y el radio del mismo. Aun cuando no se perdiera energía por radiación al espa-

cio, la cantidad total de calor gravitatorio generado durante la formación de un cuerpo del tamaño de Ceres —el mayor asteroide, de unos 500 kilómetros de radio— sería aproximadamente la décima parte del mínimo requerido para que se inicie la fusión. Por tanto, este tipo de fuente de calor resulta insuficiente para producir fenómenos de magmatismo asteroideo.

Al igual que el resto de los cuerpos planetarios, los asteroides contienen pequeñas cantidades de elementos radiactivos, cuya desintegración genera otros elementos que terminan por ser estables. Durante el proceso de desintegración se liberan cantidades importantes de energía, suficientes para aumentar local o globalmente la temperatura del interior de los cuerpos donde residen. La desintegración de los isótopos radiactivos del uranio, torio y potasio constituye la principal fuente de calor de origen radiactivo en los planetas terrestres. Dicha desintegración procede con lentitud, motivo por el cual la energía que se libera en forma de calor también se transmite parsimoniosamente en el interior de los cuerpos que los contienen. Los asteroides carecen de magnitud suficiente para acumular de un modo eficaz el calor originado por la desintegración radiactiva lenta de los isótopos de uranio, torio y potasio. Antes bien, el calor así producido en el interior se transmite por conducción hasta la superficie, donde se pierde por radiación hacia el espacio interplanetario.

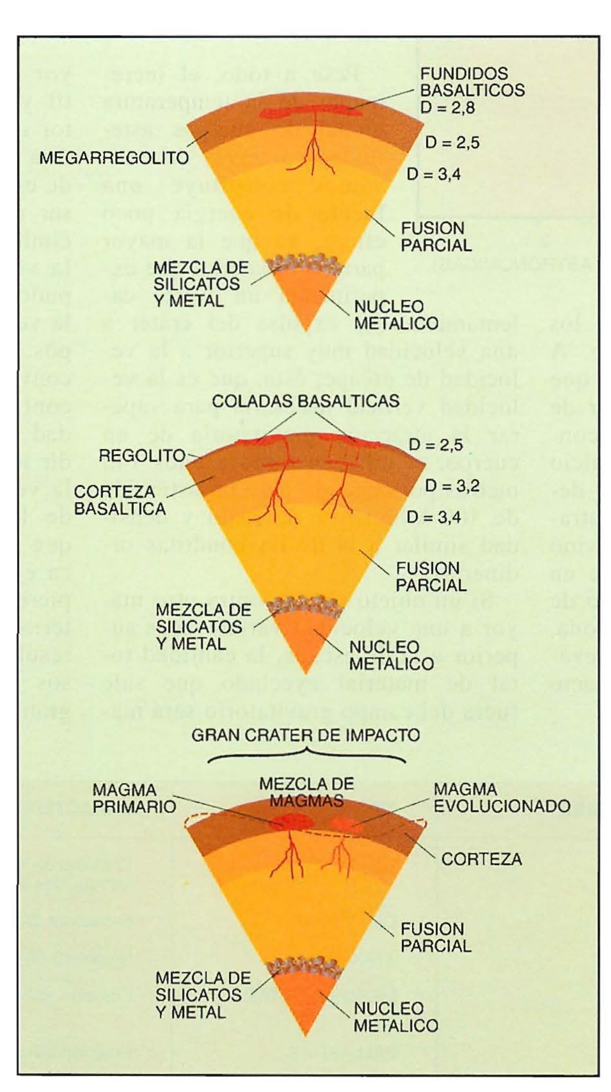
Sin embargo, durante los primeros tiempos del sistema solar, existieron otros elementos radiactivos cuya desintegración, mucho más rápida que los antes citados, sí podría calentar eficientemente cuerpos de tamaños reducidos (como los asteroides), ya que la pérdida por radiación sería lenta con respecto a la transmisión de calor en el interior del cuerpo, y su temperatura podría así incrementarse de forma sustancial.

Uno de estos radiosótopos de vida corta es el ^{26}Al. Su presencia en la nebulosa solar primitiva se descubrió gracias a la detección de anomalías de ^{26}Mg —el isótopo estable en el que se convierte— en las inclusiones refractarias de las condritas carbonáceas de Allende y Murchison. (Estos dos meteoritos cayeron en México y Australia, respectivamente, en 1969.) Tales inclusiones, ricas en calcio y aluminio, contienen minerales que se consideran directamente condensados por enfriamiento de un gas cuya composición se asemeja a la del Sol actual.

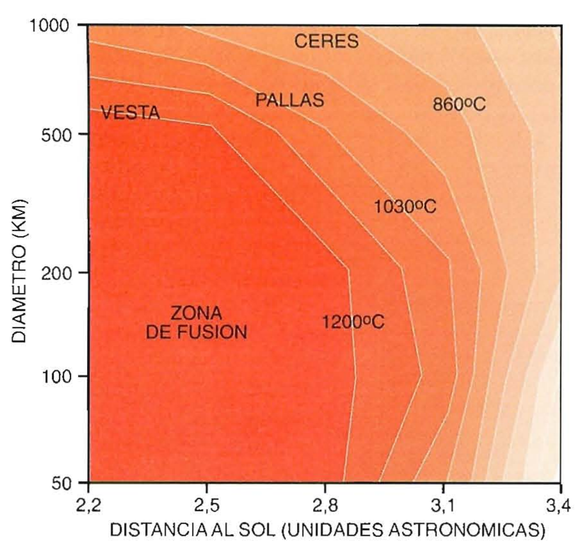
Si los asteroides incorporaron ^{26}Al en el momento de su acreción, y lo hicieron en la proporción hallada en las citadas inclusiones, su temperatura inicial podría haberse incrementado en algunos cientos de grados, para mantenerse así durante algunos millones de años. Aunque bastan tal calentamiento y duración para inducir los fenómenos de metamorfismo del tipo de los observados en la mayoría de las condritas, es improbable que el incremento de temperatura debido de manera exclusiva a la desintegración del ^{26}Al permitiera la formación de zonas fundidas en un asteroide, pues las cantidades detectadas son insuficientes. Además del aluminio, se han identificado radioisótopos de vida corta del hierro y calcio (^{60}Fe y ^{41}Ca), que podrían haber contribuido a un calentamiento apreciable de sus cuerpos progenitores.

Las señales de fragmentación, deformación de granos minerales y venillas de fusión en numerosos meteoritos ponen de manifiesto la importancia de los procesos de impacto que afectaron a los asteroides de los que provienen. Tales procesos de impacto han modelado las superficies asteroideas, a veces incluso provocando su desintegración, desde los tiempos de la acreción primaria, hace unos 4600 millones de años.

No resulta difícil verificar si un determinado meteorito magmático procede de un impacto, ya que la energía producida por las ondas de choque se transmite de manera muy localizada, y los efectos cristalográficos y térmicos que genera pueden variar drásticamente en pocos centímetros. En este sentido, el estudio de meteoritos con diferentes componentes reviste particular interés, pues permite identificar los materiales precursores y sus productos de fusión. Gracias a este tipo de estudios se conocen mejor cuáles son los



4. ESCENARIOS POSIBLES de generación y extrusión de magmas en cuerpos asteroideos. La composición de tales magmas depende de la del material precursor y el grado de fusión parcial que experimenta. Así, un 20 % de fusión de un material condrítico generaría magmas de naturaleza basáltica cuya densidad (de 2,5 a 2,8 gramos por centímetro cúbico) les permitiría ascender a zonas más superficiales del cuerpo progenitor. Su posible erupción al exterior estaría controlada fundamentalmente por la naturaleza y espesor del regolito asteroideo, o capa externa formada por rocas fragmentadas por repetidos impactos. El material no fundido acabaría formando un "manto", de densidad superior (3,2-3,5 gramos por centímetro cúbico) y composición más rica en magnesio y hierro. Si el grado de fusión es elevado (superior al 50 %), el metal puede hundirse hacia el centro del cuerpo y crear un núcleo. Si el grado de fusión parcial es heterogéneo a través del cuerpo progenitor, pueden desencadenarse procesos de mezcla de magmas, aumentando así la variedad de rocas ígneas producidas.



5. DISTRIBUCION heliocéntrica de las temperaturas máximas alcanzadas en un cuerpo asteroideo de composición condrítica en función de su tamaño. Se supone que el calentamiento lo han provocado corrientes electromagnéticas inducidas por la radiación solar. Como referencia, se proporcionan las coordenadas de los tres asteroides mayores del cinturón principal. La "zona de fusión" señala el inicio de procesos magmáticos en un cuerpo progenitor, no necesariamente su fusión total, a temperaturas superiores a los 1200 ºC, aunque este límite puede variar ligeramente en función de la composición. Cada contorno sucesivo representa un descenso de temperatura de unos 85 ºC.

efectos químicos que producen los procesos de fusión por impacto. A este respecto se ha observado que los olivinos cristalizados a partir de fundidos de impacto presentan concentraciones bastante altas de calcio en su estructura, lo que podría deberse a que tal elemento queda atrapado en la red cristalina del olivino gracias al rápido enfriamiento de un magma rico en calcio. El estudio de meteoritos brechoides proporciona, pues, un criterio adicional para evaluar el posible origen por impacto de algunos meteoritos ígneos.

Pese a todo, el incremento de la temperatura global de cuerpos asteroideos a través de colisiones constituye una fuente de energía poco eficaz, ya que la mayor parte del material que experimenta un fuerte calentamiento se expulsa del cráter a una velocidad muy superior a la velocidad de escape; ésta, que es la velocidad vertical necesaria para superar la atracción gravitatoria de un cuerpo, se cifra en torno a unos 140 metros por segundo para un asteroide de 100 kilómetros de radio y densidad similar a la de las condritas ordinarias.

Si un objeto choca contra otro mayor a una velocidad varias veces superior a la de escape, la cantidad total de material eyectado que sale fuera del campo gravitatorio será mayor que la masa del propio proyectil y, por tanto, el cuerpo progenitor que sufre el impacto experimentará una pérdida de masa. Al hilo de este razonamiento podríamos pensar que, durante el período de crecimiento de los cuerpos asteroideos, la velocidad relativa de acreción no pudo haber sido mucho mayor que la velocidad de escape de tales cuerpos. Si toda la energía cinética se convierte en calor y este calor queda confinado en el proyectil, la velocidad de impacto necesaria para fundir los cuerpos en colisión decuplica la velocidad de escape de un cuerpo de 100 kilómetros de radio. Puesto que la conversión de energía cinética en calor no es total, sino que se pierde por radiación al espacio exterior de parte del calor producido, resulta lógico inferir que los procesos de impacto no pueden formar grandes masas fundidas en asteroi-

CLASE	SUBCLASE	TIPO	CARACTERISTICAS PRINCIPALES
SIDERITAS		HEXAHEDRITAS	Cristales de kamacita. Bandas de Neumann (producidas por impacto). Níquel 4-6%.
		OCTAHEDRITAS	Estructura Widmanstätten. Níquel 6-15%.
		ATAXITAS	Níquel 10-66%.
LITOSIDERITAS (O SIDEROLITAS)		MESOSIDERITAS	Fracción silicatada basáltica (piroxeno y plagioclasa).
		PALLASITAS	Fracción silicatada dunítica (olivino).
LITITAS	CONDRITAS	ENSTATITA (E)	Silicatos muy pobres en hierro y calcio. Metal con hasta 4% de silicio.
		ORDINARIOS (H, L, LL)*	Grupo más común. Contenido en metal entre 15 y 1%, en volumen. Composición de los silicatos varía según grado de oxidación.
		CARBONACEAS (C)	Contienen agua y materia orgánica. Muy pobres en metal, y ricos en sulfuros de hierro-níquel.
	ACONDRITAS	AUBRITAS	Enstatita pobre en hierro y calcio.
		UREILITAS	Contienen olivino y pigeonita, y algo de hierro reducido. Relativamente ricos en carbono.
		EUCRITAS	Basálticos (piroxeno y plagioclasa).
		DIOGENITAS	Ricos en piroxeno (hiperstena).
		HOWARDITAS	Brechas de eucritas y diogenitas.

6. ESQUEMA DE CLASIFICACION de los principales grupos de meteoritos de procedencia asteroidal. (*) Las letras H, L y LL utilizadas para designar los diferentes subtipos de condritas ordinarias son acrónimos de los términos en inglés High-metal (rico en metal), Low-metal (pobre en metal) y Low-iron Low-metal (pobre en hierro y metal), respectivamente. A excepción de las condritas —de naturaleza metamórfica—, los representantes de todos los demás grupos han sufrido de una u otra manera procesos de fusión y diferenciación en sus cuerpos parentales.

des de menos de 100 km de radio.

Durante el colapso gravitatorio que sufrió la materia interestelar para dar lugar a la formación del Sol, se convirtieron en calor grandes cantidades de energía potencial. Si este calor se transportó, por convección, hacia la superficie del astro, entonces la luminosidad del Sol primitivo (en fase de T-Tauri, es decir, cuando aún expulsaba grandes cantidades de materia) debió de ser mucho mayor que la actual; en consecuencia, la radiación emitida pudo llegar a crear, por un lado, condiciones adecuadas para la fusión parcial o total de los planetésimos que se encontraran dentro de un radio de unas 2,5 unidades astronómicas, y, por otro, provocar el metamorfismo de cuerpos asteroideos situados hasta casi 4 unidades astronómicas del Sol.

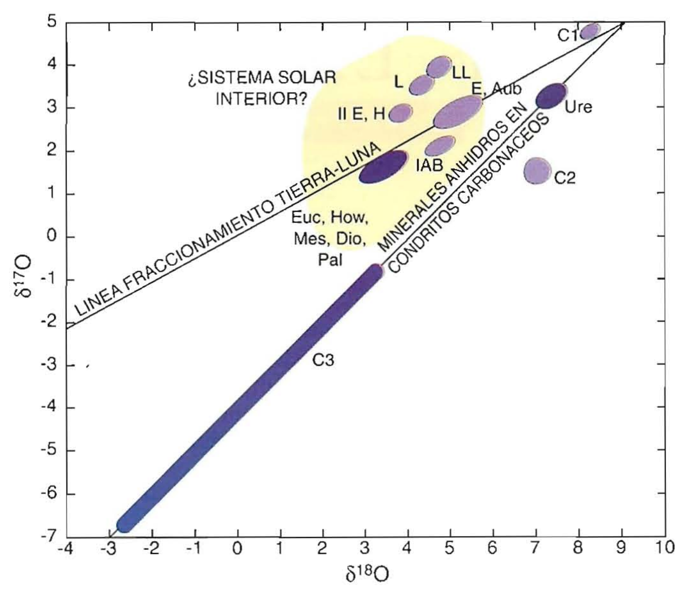
Si bien este tipo de fuente de calor por radiación podría justificar buena parte de los procesos magmáticos desarrollados en los asteroides, se desconoce la intensidad de la luminosidad del Sol primitivo, así como la influencia que ejercieron la rotación de los cuerpos progenitores y la opacidad de la nebulosa solar sobre la eficacia de un calentamiento por radiación. Por ignorar, no sabemos siquiera si el Sol atravesó una fase T-Tauri. En el mejor de los casos, este último proceso pudo provocar la fusión de planetésimos del sistema solar interior, pero parece bastante poco probable que el incremento de temperatura experimentado por tales cuerpos lograra provocar una diferenciación magmática en su interior.

Sin embargo, existe otra posible fuente de energía solar capaz de explicar la diversidad de condiciones observada en los meteoritos primitivos. En los años ochenta, se propuso la idea de que el viento solar producido durante etapas más activas de nuestra estrella pudo inducir corrientes eléctricas y elevar la temperatura de los cuerpos progenitores de los meteoritos. El rendimiento de ese tipo de calentamiento guarda estrecha vinculación con la distancia al Sol, el tamaño y la composición —sobre todo el contenido en metal— del asteroide, alcanzando su máxima efectividad en cuerpos de 50 a 100 kilómetros de radio y bastante ricos en metal. Cabe, pues, la hipótesis de que algunos meteoritos pobres en aleaciones de hierro-níquel, como la mayoría de las condritas carbonáceas, o procedentes de pequeños asteroides, no se llegaran a calentar apreciablemente y conservaran su textura y composición primigenia.

Para estudiar el magmatismo que experimentaron los cuerpos asteroideos suele recurrirse a la búsqueda de relaciones entre grupos de meteoritos ígneos y condríticos sin diferenciar. La investigación se ha centrado en la identificación de características petrológicas e isotópicas comunes a ambas clases. Basados en las similitudes, podemos crear grupos precursores y grupos derivados o productos. Por ejemplo, el "clan" de los meteoritos de enstatita lo integran aubritas y condritas de enstatita, cuya naturaleza nos remite a un proceso de formación bajo condiciones altamente reductoras; los miembros del clan comparten una composición de isótopos de oxígeno indistinguible.

Otras asociaciones destacables son las que crean las condritas ordinarias de tipo H y las inclusiones silicatadas de las sideritas del grupo IIE, que comparten una misma signatura isotópica, aunque sus relaciones petrológicas no son tan evidentes como en el caso de los meteoritos de enstatita. Asimismo, los miembros de los grupos de eucritas, diogenitas y howarditas guardan un claro parentesco con las fracciones silicatadas de las litosideritas (tanto pallasitas como mesosideritas); se ha llegado incluso a proponer, a partir de semejanzas entre los espectros de la luz reflejada por la superficie de asteroides y meteoritos, que podrían proceder de un progenitor común: el asteroide Vesta, de 288 kilómetros de radio, y que orbita alrededor del Sol a unas 2,4 unidades astronómicas.

El estudio de los meteoritos de origen ígneo es, pues, una herramienta de valor inestimable para la mejor comprensión de la actividad magmática de los cuerpos más primitivos del sistema solar. Aunque son aún muchas las preguntas que quedan por responder, está claro que los procesos ígneos han operado en la historia temprana de nuestro sistema planetario y que la actual constitución de los planetas interiores es un producto de dicha actividad.



7. DIAGRAMA DE ISOTOPOS ESTABLES DE OXIGENO (masa atómica 16, 17 y 18) donde se representan las composiciones características de los grupos principales de meteoritos condríticos y magmáticos. El símbolo δ representa la desviación del análisis del isótopo correspondiente —en tanto por mil— con respecto a la composición patrón de la media del agua oceánica. Así, δ ^{i}O viene representado por el valor de $[\{(^{i}O/^{16}O)_{muestra}/(^{i}O/^{16}O)_{patrón}\}-1]\times 1000$. Nótese la identidad isotópica entre algunos grupos de meteoritos, como las condritas de enstatita (E) y aubritas (Aub), condritas *H* e inclusiones silicatadas en sideritas de tipo *IIE*, y las litosideritas (Mesosideritas y Pallasitas) con acondritas basálticas (Eucritas y Howarditas) y Diogenitas. Dichas identidades indican que tales grupos se formaron a partir de reservorios isotópicos homogéneos, y ofrecen indicaciones sobre la relación genética entre meteoritos primitivos (precursores) y evolucionados (productos de actividad ígnea).

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ASTEROIDS: THEIR NATURE AND UTILIZATION. C. T. Kowal. Ellis Horwood, Ltd., 1988.

DISCOVERY OF AN UNMELTED H-CHONDRITE INCLUSION IN AN IRON METEORITE. I. Casanova, Th. Graf y K. Marti, en *Science*, volumen 268, páginas 540-542, 1995.

ELS METEORITS: QUÈ SÓN I PER A QUÈ SERVEIXEN. J. Llorca. Institut d'Estudis Ilerdencs, 1995.

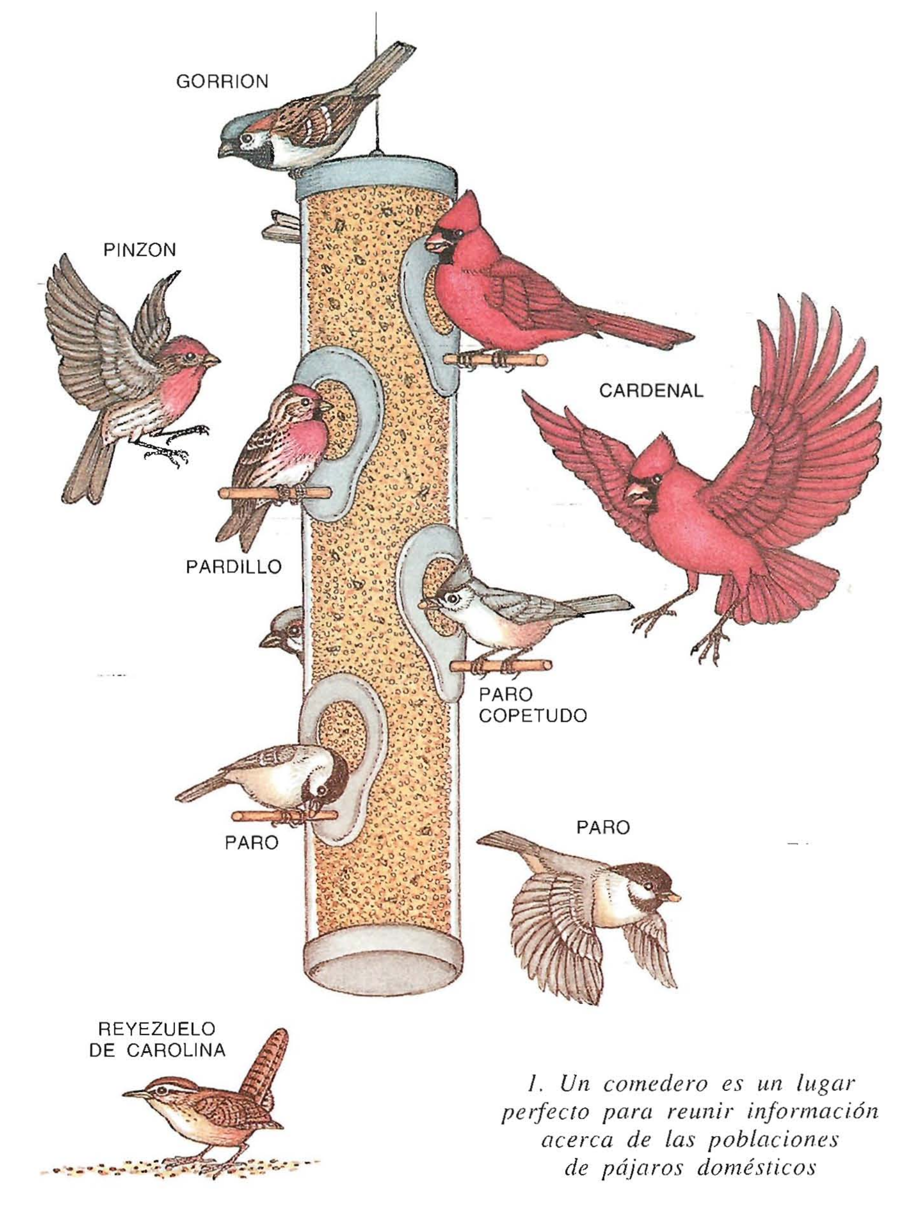
TALLER Y LABORATORIO

Shawn Carlson

Los placeres de la ornitología de sillón

Mis catorce años me resultaron muy duros. Cada miembro de mi familia se enfrentó a su modo al amargo divorcio de mis padres. Por lo que a mí respecta, me encerré dentro de mí mismo enfurecido de cólera. Lo abandoné todo. Incluso dejé de asistir a las acampadas mensuales de los *boy scouts*, que, hasta entonces, habían sido mi única escapada.

La compañía 581 estaba mandada por un hombre extraordinario. Para muchos de los que practicábamos el escultismo, Joseph Kessler era un segundo padre. A mí me tendió la mano del modo más insólito. Aquel antiguo miembro de la Sociedad Nacional Audubon me telefoneó un buen día para insistir en que le acompañara al recuento de aves que la entidad efectuaba cada año por Navidad. No importaba desde luego que yo supiera nada de pájaros. Aquella tarde aprendí a distinguir un sarapico vagabundo de un vuelvepiedras rojizo y descubrí un nuevo sentimiento de camaradería. Desde entonces, he encontrado en la observación de los pájaros una fuente de renovación emocional.



1. Un comedero es un lugar perfecto para reunir información acerca de las poblaciones de pájaros domésticos

Sospecho que el poder rejuvenecedor de la afición a los pájaros podría explicar por qué hay tantos aficionados a la ornitología. Su inquebrantable dedicación ha convertido el recuento de Navidad en uno de los programas de investigación para aficionados más importantes. El primer recuento tuvo lugar en la Navidad de 1900 en protesta contra la tradicional matanza festiva en la que por entonces competían equipos de cazadores para abatir el mayor número de piezas en un día. En lo que se inició con sólo 25 grupos de observadores del noreste actualmente participan 45.000 personas de 1600 equipos repartidos por toda Norteamérica y partes del Caribe y el Pacífico. Desde mediados de diciembre a primeros de enero, ese ejército de observadores registra una cifra estimada de 74 millones de aves pertenecientes a unas 1200 especies. Los resultados aparecen cada invierno en un número especial de la revista *Field Notes* de la Sociedad Nacional Audubon.

La base de datos del recuento de Navidad no tiene paralelo; brinda una instantánea anual de las distribuciones de los pájaros, que se remonta hasta casi 100 años. Pero tamaño registro no es más que eso, una foto fija. Las aves son vertebrados muy complejos, y el recuento navideño no proporciona información suficiente ni siquiera para empezar a investigar la dinámica de sus actividades. Cuando la presión del entorno, pensemos en la ejercida por un invierno crudísimo, adquiere una intensidad extraordinaria, poblaciones enteras podrían abandonar de repente su habitación normal para invadir otra (fenómeno que los ornitólogos llaman "irrupción"). Las especies que ya se hallaban en esa zona pueden percibir la presión de la competencia de las recién llegadas e irrumpir por su parte en una zona nueva o comenzar a perecer. Tal lucha por



los recursos se suma a la migración normal.

El estudio de estos fenómenos requiere una base de datos más amplia. Para acometer un registro habría que movilizar decenas de millares de observadores repartidos por todo el continente que recontaran aves a lo largo del año entero. No hay, ni de lejos, biólogos suficientes para esa tarea. Por suerte, existe un recurso paliativo, capaz de realizar observaciones de calidad: el mundo de los aficionados.

En 1987 los ornitólogos del Laboratorio de Ornitología de Cornell (LOC) y del Observatorio Ornitológico de Long Point crearon un programa de investigación que empareja el entusiasmo de los aficionados con la competencia de los profesionales. Así surgió una espléndida asociación para la investigación. Se trata del proyecto FeederWatch, que está revolucionando nuestra concepción de la ecología aviar. Para desarrollar cualquiera de sus tareas, le basta con preparar un comedero de aves, comprar o buscar algunas semillas y disponer de una butaca cómoda. Toda la familia puede agregarse a la empresa.

Nunca fue tan sencillo investigar. Los participantes examinan sus comederos durante dos días consecutivos cada dos semanas y toman nota del mayor número de especies que ven en un comedero en cualquier momento. Anotan sus registros en unos formularios legibles por un ordenador y los envían al LOC al final de la temporada. Y eso es todo. *Birdscope*, el boletín trimestral del LOC, informa de los últimos hallazgos del proyecto y de otras noticias relativas a la ornitología. El número de otoño tratará de los resultados de la campaña de 1996.

El año pasado los aficionados remitieron casi 70.000 formularios, mucha más información que la reunida en el recuento navideño de la Sociedad Audubon. En la base de datos FeederWatch se integran medio millón de observaciones, lo que la convierte en el inventario más exhaustivo de su naturaleza. Esta información ha constituido una bendición para la ciencia. Los ornitólogos pueden ya examinar sutiles variaciones en el comportamiento de una especie visitante del comedero, en el espacio y en el tiempo.

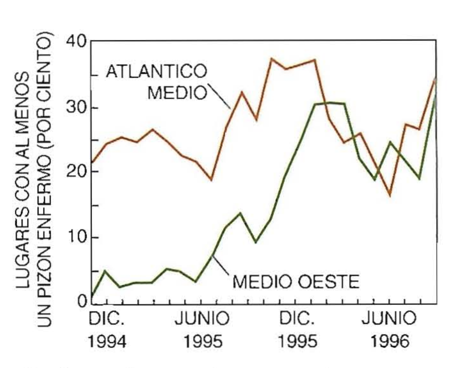
Por ejemplo, cuando llega el invierno y le falla su alimento, el pequeño y bellísimo pardillo común acomete una irrupción masiva. Por millones ponen rumbo al sur en busca de calorías. Los ornitólogos de Cornell pudieron seguir los pasos de esos pájaros semana a semana, conforme invadían ambientes más hospitalarios huyendo del invierno de 1993-94. Fue un sobresaliente en ornitología, uno de los muchos logrados por el Proyecto FeederWatch.

Estas informaciones revelan asimismo sutilezas tales como los efectos de una tormenta intensa sobre la población aviar. Las observaciones de FeederWatch mostraron que el número de reyezuelos de Carolina que había en los lindes de su habitación del noreste decayó de forma brusca tras una potente nevada en enero de 1994. Sin embargo, una tormenta de características similares acaecida dos meses antes no pareció afectarles. Evidentemente, los reyezuelos viven en el filo de la navaja. La evolución no los ha preparado bien para resistir inviernos duros y, si la meteorología adversa se prolonga en demasía, el reyezuelo de Carolina recibe un fuerte castigo.

Los observadores de nuestro proyecto colaboran en la cartografía de la invasión de especies foráneas. De acuerdo con los datos recabados, el pinzón doméstico, accidentalmente introducido en Long Island en 1940, sigue avanzando en todas las direcciones. Y cuando el pinzón se enfrenta al gorrión (introducido en la zona a mediados del siglo XIX) en mutua competición por los recursos, el gorrión pierde sin paliativo y su número cae en picado.

Pero no todo es de color de rosa para el pinzón. Cierta bacteria, *Mycoplasma gallisepticum*, que antaño constituía una plaga confinada a las aves de corral, experimentó una mutación recientemente y comenzó a infectar a los pinzones y especies afines que forrajean en los gallineros. Esta bacteria contagiosa infecta los ojos y puede incluso provocar la muerte al infortunado hospedador. Los zoólogos de FeederWatch han elaborado un cuestionario especial para facilitar a los observadores la identificación de los pinzones afectados. Tras 24 meses de recogida de datos y 22.000 formularios, los investigadores pueden ya documentar la propagación de la enfermedad con un detalle impresionante [*figura 2*].





2. Las observaciones en los comederos siguen la pista a la propagación de la enfermedad del ojo entre los pinzones domésticos

El Proyecto FeederWatch es el programa de investigación ideal para cualquier naturalista en ciernes, joven o adulto. Participar en él no cuesta casi nada y sólo reclama un poco de tiempo para las observaciones. Desde luego, hay que empezar por conocer las especies locales. Una buena guía o la consulta al museo zoológico más cercano nos sacará de apuros. Otra decisión acertada es la de hacerse miembro de cualquier asociación naturalista del lugar.

Restricciones presupuestarias limitan la fase de recogida de datos del proyecto del LOC a seis meses al año, así que dispondrá de tiempo abundante para relajarse con lo que bien podría convertirse en una gratificadora pasión durante el resto de su vida. Por cierto, la intervención de Kessler hizo algo más que despertar mi amor por la ornitología. Al final, alcancé el máximo grado en escultismo.

Para unirse al Proyecto FeederWatch, envíese 15 dólares a Cornell Lab of Ornithology, Project FeederWatch SA, P.O.Box11, Ithaca, NY 14851-0011, o bien contáctese por correo electrónico con birdeducation@cornell.edu, o llame al 607-254.24.40 o al (800) 843-BIRD(2473). Puede también visitarse su página World Wide Web en http://www.ornith.cornell.edu. Los educadores deben preguntar acerca de Classroom FeederWatch. Para más información acerca de otros proyectos científicos para aficionados, llámese a la Society for Amateur Scientists en los teléfonos 800-873.87.67 o 619-239.88.07, o visítese su página Web en http//www.thesphere.com/SAS/

JUEGOS MATEMÁTICOS

Ian Stewart

Recorridos de caballo

Entre los problemas clásicos de las matemáticas recreativas se cuentan los "recorridos de caballo": un caballo de ajedrez ha de ir desplazándose por tableros de diversas formas y tamaños, de modo que visite cada casilla solamente una vez. Al saltar el caballo del ajedrez se desplaza, como bien sabe el lector, dos casillas en dirección paralela a uno de los lados del tablero y una en dirección perpendicular a él. Se dice que el recorrido es cerrado, o sea, un "periplo", si en el último salto (que no se cuenta) el caballo retorna a la casilla de partida.

Según parece, el problema fue planteado alrededor del año 1700 por el matemático inglés Brook Taylor, quien preguntaba qué recorridos de caballo podrían existir en un tablero ordinario de 8×8 casillas. Las primeras soluciones llegaron al poco, debidas a Pierre de Montmort y a Abraham de Moivre. Desde entonces, el problema se ha generalizado a tableros de otras diversas formas, a "tableros" tridimensionales e incluso a tableros infinitos. Pero en 1991, Allen J. Schwenk, de la Universidad de Michigan Oeste en Kalamazoo, observó que la bibliografía disponible parecía dejar en el olvido una cuestión del todo natural, a saber: ¿en qué tableros rectangulares son posibles recorridos cerrados de caballo?

La bibliografía sobre recorridos de caballo, aunque abundante, está muy dispersa; recuérdense los inevitables *Amusements in Mathematics*, de H. E. Dudeney, *Mathematical Recreations and Essays*, de W. W. Rouse Ball y H. S. M. Coxeter, y *Mathematical Recreations*, de M. Kraitchik. Se cree que la pregunta de Schwenk debió haber sido resuelta por Leonhard Euler o Alexandre-Teophile Vandermonde, pero no tenemos documentos donde se enuncie el resultado obtenido, ni su demostración.

Entre las referencias citadas, es Kraitchik quien más se aproxima a una solución, si bien lo hace suponiendo que uno de los lados del rectángulo tiene siete casillas o menos. Ball se ocupa solamente del caso 8×8. Dudeney presenta varios problemas reductibles al caso 8×8, así como un recorrido por las caras de un cubo de $8 \times 8 \times 8$. El propio Schwenk desarrolló una solución que arroja luz sobre una serie de puntos de la matemática discreta. Me limitaré aquí a resumir su brillante análisis; para los detalles completos debe consultarse su artículo "Which Rectangular Chessboards Have a Knight's Tour?" (*Mathematics Magazine*, vol. 64, n.º 5, páginas 325-332; diciembre de 1991).

Desde el punto de vista matemático, el problema del recorrido de caballo equivale a la determinación de un "ciclo hamiltoniano" en un grafo. Un grafo consiste en una colección de puntos, llamados nodos, conectados por líneas, los "lados". Un ciclo hamiltoniano es un circuito cerrado que visita cada nodo exactamente una vez. El grafo de un tablero dado se obtiene situando un nodo en el centro de cada casilla y trazando después lados que se encuentren separados por un salto de caballo [*véase la figura 3*]. Resulta conveniente colorear los nodos de dos colores, oscuro y claro, de acuerdo con la disposición habitual del tablero. Fijémonos en que el caballo, en cada salto, pasa de una casilla a otra de distinto color, por lo que los nodos de un ciclo hamiltoniano han de ser alternativamente de color oscuro y claro. Esta condición implica que el número total de nodos ha de ser par.

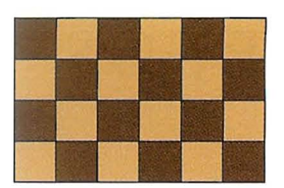
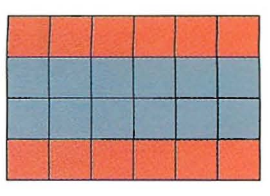
El tablero de 3×5 cuenta con 15 nodos —número impar—, por lo que hemos demostrado, sin tan siquiera proponérnoslo, que en un tablero de 3×5 no son posibles los recorridos cerrados de caballo. Otro tanto vale para cualesquiera tableros rectangulares de dimensiones $m \times n$ en el que las dimensiones m y n vengan ambas dadas por números impares.

Los razonamientos de esta clase se denominan criterios de paridad. Una demostración de paridad más sutil, inventada por Louis Pósa, demuestra la inexistencia de recorridos cerrados de caballo en ningún tablero de $4 \times n$. La idea de Pósa consiste en introducir un segundo coloreado en el cual las hileras superior e inferior del tablero son rojas, mientras que las dos centrales son azules [*véase la figura 2*]. Los nodos azules pueden quedar unidos a nodos azules o a nodos rojos, pero los nodos rojos solamente pueden quedar conectados con nodos azules. Así pues, cualquier candidato a ciclo hamiltoniano ha de estar formado por nodos rojos aislados, separados entre sí por uno o varios nodos azules.



1. En un recorrido de caballo, éste ha de ir saltando por el tablero y visitar todos y cada uno de los cuadros exactamente una vez

Pero el número de nodos rojos y de nodos azules es el mismo, por lo que, en realidad, los nodos rojos y azules han de ir alternándose al recorrer el ciclo. Otro tanto vale, sin embargo, para los nodos de colores claro y oscuro al utilizar el coloreado más tradicional. Por tanto, si comenzamos en el vértice superior izquierdo, sacamos la conclusión de que todos los nodos rojos son de color oscuro y todos los nodos azules lo son del claro. Dado que los dos esquemas de coloreado son evidentemente distintos, tal conclusión es absurda; por consiguiente, el presunto ciclo no puede existir.

2. Coloreado de las casillas que facilita la solución del problema del recorrido en el tablero de 4 × 6

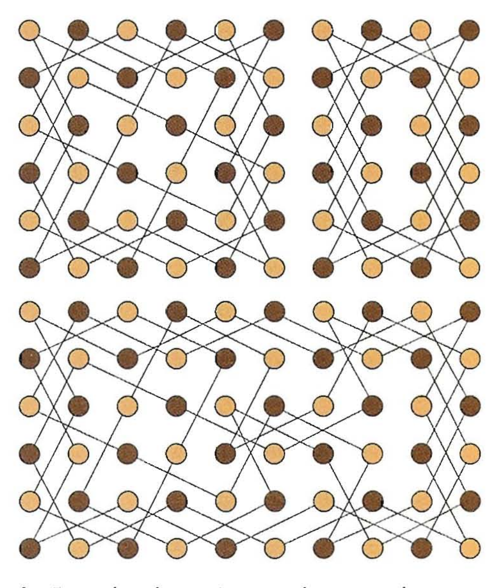
Schwenk ha proporcionado una elegante caracterización de aquellos tableros rectangulares que permiten recorridos cerrados del caballo, al descubrir que un tablero de $m \times n$ (supondremos que m es menor o igual que n para evitar duplicaciones) permite un recorrido del caballo a menos que:

m y n sean ambos impares
$m = 1$, 2 o 4
$m = 3$ y $n = 4$, 6 u 8.

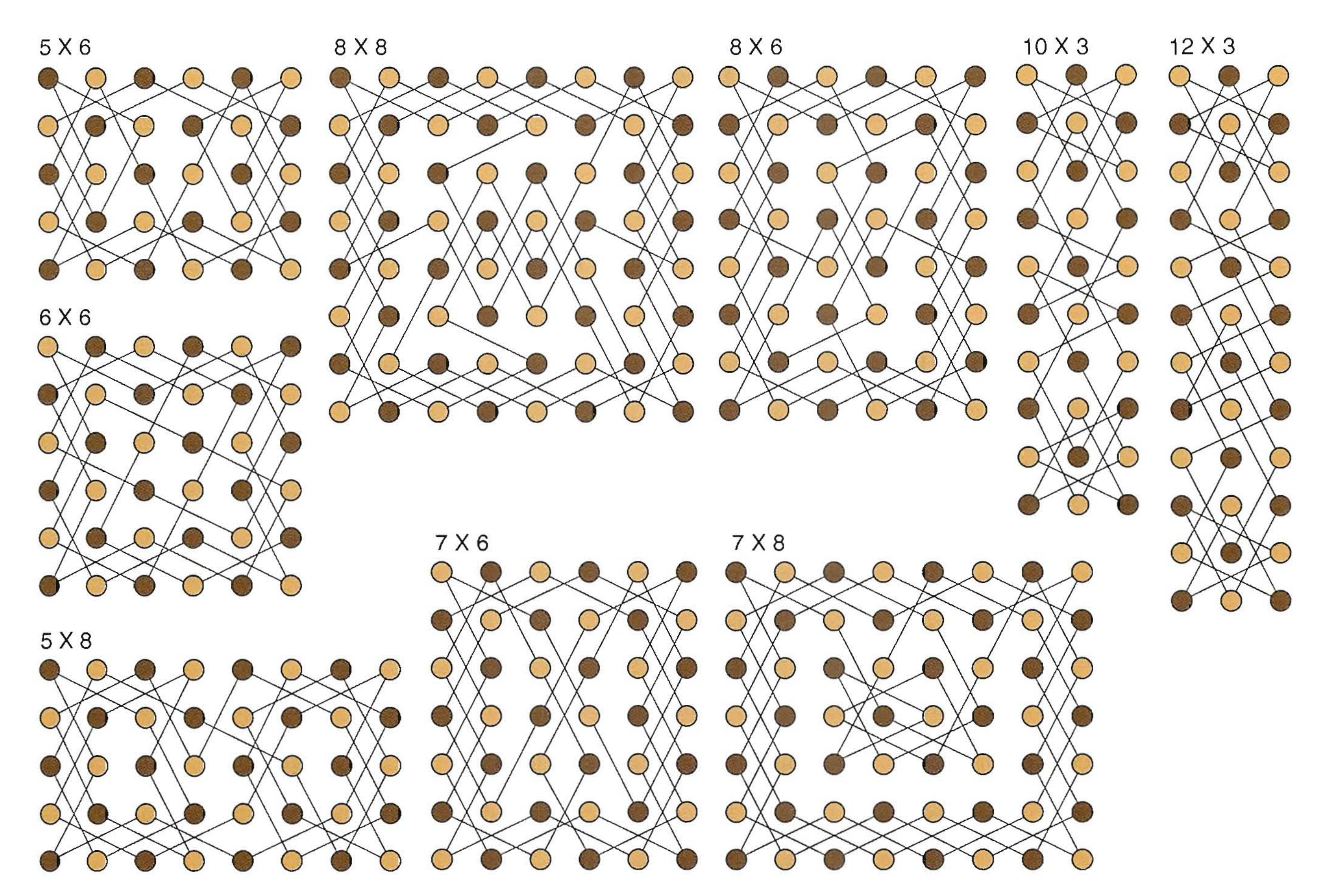
Permítaseme dar un esbozo de la demostración. Hemos eliminado ya los casos en los que m y n son ambos impares, o $m = 4$. Cuando $m = 1$ o 2, lo que ocurre es, sencillamente, que el caballo no tiene espacio para dar la vuelta por el tablero. De hecho, el nodo del vértice superior izquierdo solamente tiene conexión con un lado, por lo que no podrá haber ciclos cerrados que pasen por él. El caso de 3×4 queda resuelto con el razonamiento de Pósa. Para el tablero de 3×6, observemos que al eliminar dos nodos de lo alto y lo bajo de la columna 3, el grafo queda escindido en tres piezas desconectadas. De existir un ciclo hamiltoniano que visitase cada nodo una sola vez, también éste quedaría escindido en tres piezas. Sin embargo, la remoción de dos nodos en un ciclo hamiltoniano produce siempre dos piezas desconectadas. El caso de 3×8 es más complicado; sugiero al lector que lo analice por sí mismo o que consulte el artículo de Schwenk.

Queda así completa la demostración de imposibilidad en los casos designados, pero todavía está por demostrar la existencia de recorridos en los tableros de todos los demás tamaños. La idea esencial estriba en que todo recorrido sobre un rectángulo de $m \times n$ puede siempre ampliarse a un recorrido en un rectángulo $m \times (n+4)$, con tal de que se verifiquen ciertas condiciones de carácter técnico relativas a la existencia de lados específicos [*véase la figura 3*]. Además, tales condiciones siguen siendo válidas para el recorrido por el tablero ampliado y, consiguientemente, la extensión puede repetirse indefinidamente. Por simetría, un recorrido sobre un rectángulo $m \times n$ puede generalizarse siempre a otro sobre un rectángulo $(m+4) \times n$.

En consecuencia, si tenemos, por ejemplo, un recorrido sobre un tablero de 5×6, sabemos que podemos encontrar también recorridos sobre los rectángulos de tamaños 5×10, 5×14, 9×6, 9×10, 9×14, 13×6, 13×10, 13×14, y así sucesivamente. Cada uno de los "tamaños iniciales" genera una familia entera de tamaños



3. Los desplazamientos de un caballo por el tablero quedan reflejados en un grafo. Los puntos, o nodos, representan casillas; los conectados por líneas corresponden a saltos del caballo. La ampliación de un recorrido de caballo desde el tablero 6 × 6 (arriba, izquierda) *al de 6 × 10* (abajo) *se consigue adosando un recorrido correspondiente a un tablero de 6 × 4* (derecha, arriba)



4. Bastan nueve grafos para proporcionar las plantillas desde las cuales, por ampliación, pueden construirse todos los demás recorridos de caballo

para los cuales la existencia de recorridos está garantizada.

El paso final consiste en hallar un número suficiente de tamaños iniciales diferentes con los cuales generar la totalidad de tamaños requeridos. Resulta que nueve son suficientes: los tableros de tamaños 5×6, 5×8, 6×6, 7×6, 7×8, 8×6, 8×8, 10×3, y 12×3 [*véase la figura 4*]. A partir de éstos, y de los correspondientes diagramas resultantes de hacerlos girar 90 grados, más las ampliaciones obtenidas al añadir múltiplos de 4 a cada lado, podemos generar recorridos de todos los tamaños posibles. La demostración está completa.

Acuse de recibo

"Monopoly: segunda aproximación" [diciembre de 1996] produjo un abultado correo, repleto de nuevos resultados teóricos. Jeffrey S. Lehman, de la facultad de derecho de la Universidad de Michigan, me comentó su libro *1,000 Ways to Win Monopoly Games* (Dell, 1975), escrito en colaboración con Jay Walker. También ellos recurrieron al análisis mediante cadenas de Markov para calcular las probabilidades de las jugadas de Monopoly.

Isaac Lin me informó de un libro "de obligada lectura para contumaces del Monopoly", a saber, el *Monopoly Book*, por Maxine Brady (D. McKay Company, 1974), que alude a un análisis computarizado efectuado por Irvin R. Hentzel. David R. Miller, de Arlington, tuvo la amabilidad de enviarme la referencia del artículo original de Hentzel; se trata de "How to Win at Monopoly" (*Saturday Review of Sciences*, vol. 1, páginas 44-48; abril de 1973). La simulación de Hentzel incluía los efectos de las cartas CAJA DE COMUNIDAD y AZAR, así como de las reglas de la Cárcel; además, calculaba los ingresos medios por vuelta de las diversas propiedades y monopolios.

Eugene McManus, de Okinawa, me hizo saber que utilizó el Monopoly con el fin de enseñar técnicas de gestión a los estudiantes de primer ciclo. Con su ayuda, calcularon las funciones de retorno de inversión correspondientes a cada propiedad, descubriendo que existen ciertas propiedades en las que es preferible no construir hoteles: el retorno máximo se obtiene con cuatro casas, y en ocasiones, con sólo tres. Comentó asimismo los aspectos de simetría del juego: "Hay cuatro 'barrios'. Hay cuatro ferrocarriles, uno en cada barrio. Cada ferrocarril divide al barrio en dos partes, 'el lado bueno de las vías' y el 'lado malo'. Las propiedades situadas en el lado bueno proporcionan retornos de inversión elevados; las del lado malo tienen retornos de inversión mucho más bajos."

—I. S.

La Tierra

Construcción de una idea

THINKING ABOUT THE EARTH: A HISTORY OF IDEAS IN GEOLOGY, por David Oldroyd. The Athlone Press; Londres, 1996. **THE BIBLICAL FLOOD**, por Davis A. Young. William B. Eerdmans Publishing Company; Grand Rapids, 1995. **ARISTÓTELES. ACERCA DEL CIELO. METEOROLÓGICOS.** Edición de Miguel Candel. Gredos; Madrid, 1996.

THE MAPPING OF NEW SPAIN. INDIGENOUS CARTOGRAPHY AND THE MAPS OF THE RELACIONES GEOGRÁFICAS, por Barbara E. Mundy. The University of Chicago Press; Chicago, 1996. **THE FURTHEST SHORE. IMAGES OF TERRA AUSTRALIS FROM MIDDLE AGES TO CAPTAIN COOK**, por William Eisler; Cambridge University Press; 1995.

COSMO E APOCALISSE. TEORIE DEL MILLENNIO E STORIA DELLA TERRA NELL'INGHILTERRA DEL SEICENTO, por Amalia Bettini. Leo S. Olschki editore; Florencia, 1997. **GENESIS AND GEOLOGY**, por Charles Coulston Gillispie. Harvard University Press; Cambridge, 1996. **DEL DILUVIO AL MEGATERIO. LOS ORÍGENES DE LA PALEONTOLOGÍA ESPAÑOLA**, por Francisco Pelayo. CSIC; Madrid, 1996.

De la geología de su tiempo decía William Whewell, filósofo del siglo XIX, que era una ciencia paleoetiológica, porque abordaba las causas que actuaron en el pasado. Así fue desde los propios inicios de la disciplina, como nos recuerdan Francisco Candel y Davis A. Young en su estudio respectivo de dos ideas cruciales a lo largo de centurias: el dinamismo terrestre de cuño aristotélico (*Meteorológicos*) y el diluvio (*The Biblical Flood*).

En el curso del relato histórico que nos sirve de marco general (*Thinking about the Earth: A history of ideas in Geology*), de David Oldroyd, nos saldrán al paso un puñado de cuestiones que se repiten en busca de una solución que se resiste. ¿Qué es la Tierra? ¿Cómo se formó? ¿De qué consta? ¿Fue en el pasado tal como la vemos hoy? Ni siquiera la vigente teoría de la tectónica de placas, con toda su potencia, ha disipado todas las dudas.

No hay cultura que no tenga, sobre la formación de la Tierra, su explicación mítica. Una de las fabulaciones más antiguas es la babilónica Enuma Elish, escrita en tablillas de arcilla. Marduk, tras librar una feroz batalla con las aguas primitivas (la diosa Tiamut), formó con el cuerpo de su víctima el cielo, fijó las constelaciones, puso el Sol y la Luna en sus órbitas y constituyó la Tierra. La *Teogonía* de Hesiodo recoge episodios geológicos descritos en términos mitopoyéticos: la batalla entre Zeus y los Titanes representa la ingente erupción volcánica de la isla de Santorini, que acabó con la civilización minoica; la lucha entre Zeus y Tyfeo, la violentísima erupción del Etna acontecida en el 735 a.C.

Platón en el *Fedón* veía un complejo mundo subterráneo, surcado por canales, en cuyo centro había una gran masa de agua, el Tártaro. A esa fuente de los ríos sumaba otras torrenteras de fuego y corrientes de lodo. La idea del Tártaro fue rechazada por Aristóteles, quien se ocupa de la Tierra en *Acerca del cielo* y, sobre todo, en los *Meteorológicos*, donde, pese al título, se explaya en temas de física, geología, oceanografía y sismología.

En un mundo eterno, los procesos dinámicos de la Tierra atraviesan ciclos, cuya duración sobrepasa la existencia de una persona. "Los mismos lugares de la tierra no son siempre húmedos ni siempre secos, sino que cambian según las formaciones y desapariciones de ríos: por eso cambian también la tierra firme y el mar y no siempre una parte permanece todo el tiempo como tierra y otra como mar, sino que nace un mar donde había tierra seca, y donde ahora hay mar, habrá de nuevo tierra."

Para Aristóteles, la Tierra era estacionaria, situada en el centro del cosmos, rodeada por una serie de esferas concéntricas y cristalinas. Jerarquiza el mundo en estratos correspondientes a los elementos fundamentales. Avanza la teoría de las exhalaciones, según la cual el aire consta de una combinación de dos especies de "gases" (o exhalaciones): una, la seca y caliente, que es en realidad el constitutivo esencial del fuego (y que identifica a veces con el humo) y otra, la húmeda y fría, que es en realidad el constitutivo esencial del agua (y que identifica a veces con el vapor). De la "exhalación" de humo se producen el rejalgar, el ocre, el azufre y afines; de la exhalación vaporosa, los metales.

Por entonces, los hebreos distinguían ya entre diluvio universal, *mabbul*, e inundaciones particulares, *nahar*. La investigación arqueológica del próximo Oriente ha puesto de relieve la existencia de narraciones diluvistas anteriores, como la de *Babylonioka*, escrita por Berossus. Más tardía, la tradición griega del diluvio de Deucalion, a la que alude Platón en el *Timeo*.

Los comentaristas cristianos (Tertuliano, Orígenes, Jerónimo, Ambrosio, Cirilo de Jerusalén y Agustín) insisten en interpretar el fenómeno en un marco alegórico de exhortación moral. Lo que no impide que se busquen razones científicas. Si críticos y escépticos cuestionaban la originalidad (la existencia de otras tradiciones anteriores), la capacidad del arca o la redistribución posterior de las especies, los Padres de la Iglesia respondían con un análisis fino de las medidas (el arca vendría a ser una suerte de ciudad flotante), reducían las otras tradiciones a diluvios locales y justificaban la redistribución con creaciones posteriores.

Los medievales no se limitaron a repetir la doctrina aristotélica. Lo vemos, por ejemplo, en Avicena y Averroes, entre los árabes, y Alberto Magno en la Escuela. Avicena dividía los minerales en débiles y fuertes; aquéllos en solubles (sales) e insolubles (sulfuros); agrupaba los fuertes en maleables (metales) y no maleables (rocas). Convencido de la capacidad de ciertos manantiales para petrificar objetos, reconoció una "virtud (potencia) mineralizadora y petrificante", que daría cuenta de los fósiles. Atribuyó la formación de los valles a la labor excavadora de los cursos de agua. Las montañas se gestaron por aglutinación de arcilla, expuesta tras la retirada del mar. Por su parte, San Alberto desarrolló la teoría aristoté-

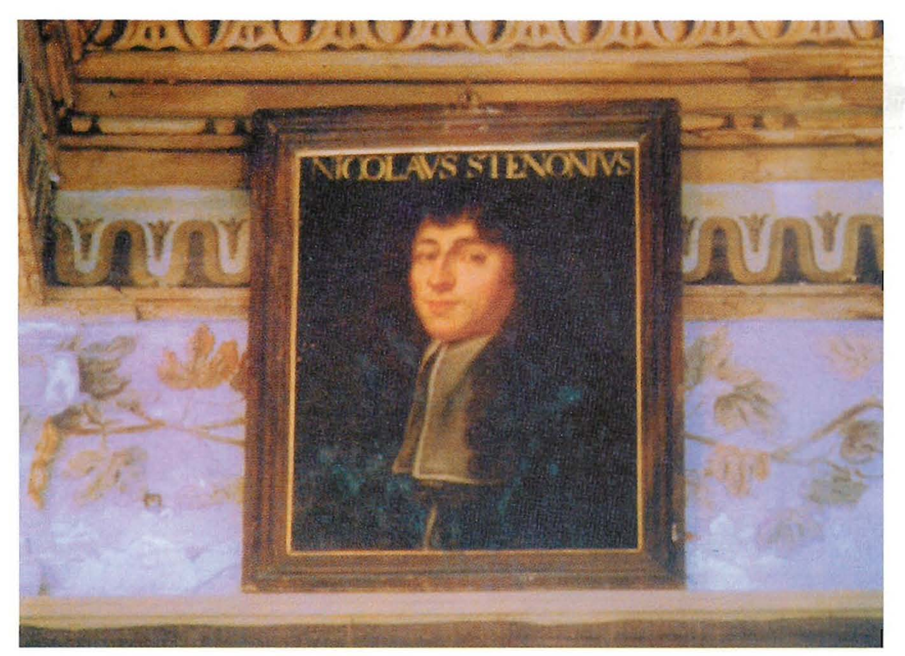


Mapamundi *del siglo XI,* Beato de Osma

lica de la doble exhalación, húmeda y seca, y aplicó al reino mineral las ideas de la generación de los animales y los procesos de digestión.

El conocimiento de la Tierra sufrió una profunda transformación con el descubrimiento del Nuevo Mundo, hecho que tuvo a su vez una influencia determinante en la interpretación del diluvio. Dos libros nos pueden ayudar a seguir ese cambio de mentalidad: *The mapping of New Spain* y *The furthest shore. Images of Terra Australis from Middle Ages to captain Cook.* El primero compendia el vasto proyecto emprendido por Felipe II para conocer —tener a la vista— hasta el último rincón de sus inmensos territorios. Los 69 mapas manuscritos que componen las *Relaciones* revelan el hiato entre dos concepciones: la europea y la indígena.

En ningún otro medio aparece la divergencia entre dos mentalidades con mayor contundencia que en dos mapas coetáneos, uno europeo y otro indígena, sobre una misma realidad: la capital azteca de Tenoctitlán. Ambos se pintaron en la primera mitad del siglo XVI. En 1524 se publicó un mapa europeo de la capital azteca por un cartógrafo anónimo, añadido a la edición de la segunda carta de



Retrato de Niels Stensen

Hernán Cortés. Este "mapa de Nuremberg" muestra la capital azteca a la manera de una ciudad europea de su tiempo: el valle de México, con Tenoctitlán en el centro. Un lago rodea la ciudad. Se observa el sistema de canales con jardines y casas flotantes. En el centro, aparecía el recinto sagrado, los templos. Al dibujar ese mapa, el artista se sirvió de dos sistemas de proyección, el euclideano y el albertino.

El otro mapa de la Tenoctitlán azteca procede del Códice Mendoza. Lo levantó un artista indígena en torno a 1542. Pintó la ciudad como él creía que se había fundado en 1325 d.C. El lago circular se ha transformado ahora en una orla rectangular. De los múltiples canales, sólo se ilustran cuatro, que intersecan el cuadro superior formando una X, que divide así la ciudad en cuatro triángulos equivalentes. No existe ninguna proyección geométrica que rija el mapa, lo que no significa que carezca de elaboración. Hay dibujadas diez figuras humanas, los fundadores: el más importante de todos, Tenoc, ocupa el centro. No se trata, pues, de una proyección geométrica, sino social.

Antes de que los españoles anclaran en las Indias, Europa imaginó un mundo en las antípodas. Pitágoras había avanzado el concepto de masas continentales meridionales que equilibraran las partes septentrionales del mundo. Dividió el orbe en cinco partes: dos zonas frías y dos templadas al norte y al sur de un ecuador tórrido. Ptolomeo creía que había una *terra incognita* formada por el cierre meridional de los océanos Atlántico e Indico. La idea de un gran sur prende y se plasma en el *Apocalipsis* ilustrado del *Beato de Liébana*. Los primeros viajeros, con Marco Polo al frente, fabulan sobre reinos legendarios que los mapas humanistas incorporan en una fantaseada Terra Australis.

Fernando Magallanes señala la Tierra del Fuego como el límite septentrional de la imaginada Terra Australis. Se suceden expediciones y descubrimientos. Jorge de Meneses arriba a Nueva Guinea; Jean Parmentier a Sumatra. El mapamundi de Gerard Mercator establece parámetros de una Terra Australis enorme que cubre la porción meridional del globo e incorpora los países mencionados por Polo, imagen que permanecería inalterada a lo largo del siglo XVI. Por fin, en 1606 Willem Jansz descubre Australia. Los viajes demostraron que el globo era mayor de lo que se había supuesto. Además, los exploradores hallaron habitantes por doquier. ¿Cómo dar cuenta de esas gentes y sus culturas? Si el diluvio había acabado con todos, salvo la descendencia directa de Noé, también aquéllos deberían ser progenie suya. No era asunto baladí dar con una solución convincente.

La mineralogía renacentista tuvo un arranque particular con Georg Bauer, Agricola, famoso por su *De re metallica*. Escribió también un tratado teórico sobre el origen y agentes que operaban en el mundo subterráneo, donde desarrollaba la idea del jugo lapidificio. Constituido por "cocción" de una mezcla de seco y húmedo, sufría luego un proceso de apelmazamiento que desembocaba en la formación de mineral. Por lo que respecta a los fósiles, destaca Jan van Gorp quien, a diferencia de Cardano y Gessner, naturalistas de gabinete, los investiga en el terreno.

La analogía de la semilla fundante (que se retrotrae a la doctrina estoica de los *logoi spermatikoi*) la desarrolló Paracelso. El agua constituía una suerte de reservorio donde estaban depositadas todas las semillas. Para Johann Baptista van Helmont, en ella encontramos las semillas de metales, piedras, sulfuros, sales y todos los minerales. Nicolas Le Fevre puso su fe en un espíritu universal por el que ciertas ideas podían imprimirse mediante fermentos particulares. En la misma onda, John Webster aventuró corrientes que surgían con ciertas semillas metálicas hacia cuevas en el interior de la tierra y allí se desarrollaban en filones metálicos.

El más sincrético de ese período sería el jesuita Athanasius Kircher. Consideraba estacionaria la tierra, instalada en el centro del cosmos y sometida a las influencias del Sol y las estrellas. Visitó el Etna y lo describió como un espiráculo o chimenea por donde respiraban las cámaras y canales de fuego que suponía se extendían por el interior de la Tierra. Imaginó dos sistemas de canales: uno para el agua y otro para el fuego. Cuando entraban en contacto se producían terremotos, volcanes, surgencias y tormentas. Había también en el interior "matrices" donde se generaban metales y vetas.

Conforme la lista de nuevas especies del Nuevo Mundo y otras partes crecía a lo largo del siglo XVI y XVII, católicos y protestantes idearon nuevas estrategias para solucionar las dificultades que planteaba el diluvio. La primera arca de la edad científica fue diseñada por Jean Borrel, una barca inmensa con dos puentes. Más peliagudo era el problema de la migración de los animales observados en sitios remotísimos, con barreras oceánicas por medio. José de Acosta y otros imaginaron puentes ahora desaparecidos.

En el siglo XVII, la teoría mecanicista sobre la materia halla en René Descartes su vertebrador. En los *Principia philosophiae* aportó una teoría de la Tierra inscrita en el marco de su astronomía. Dios, en la doctrina cartesiana, impartió un movimiento inicial a la materia. El movimiento era circular o en vórtices. En virtud

del movimiento de los corpúsculos y de su interacción mecánica, aparecieron tres tipos de partículas: corpúsculos esféricos, partículas finas y macropartículas. En los centros de vórtices del firmamento se concentraban partículas de fuego para formar soles. Pero podían emerger burbujas en las superficies más frías, las manchas solares. Acumuladas en número suficiente, acabarían por cubrir la superficie solar y apagar su luz, hasta convertirlas en un cuerpo de corteza sólida. Enlazó ese razonamiento con su idea de la Tierra, en cuyo seno hay una región de partículas de fuego, rodeada por una zona creada por coalescencia de material de manchas solares. Sobre ésta, yace una capa de corpúsculos irregulares, que limita con una capa líquida, oceánica. Por encima, otra capa de materia solida. Por último, los estratos periféricos, la atmósfera fluida de la Tierra. Con presencia de agua por encima y por debajo de la corteza principal, Descartes salvaba la concordancia con la narración bíblica.

En el siglo XVII, en efecto, asistimos a un poderoso movimiento en toda Europa por descubrir la cabal armonía entre las palabras del *Pentateuco* y las ideas emergentes de la nueva ciencia. Los fósiles, sin embargo, no acababan de encajar. Para unos, tenían origen orgánico; para otros, inorgánico La investigación de mayor fuste acometida fue la de Niels Stensen, quien combinó el enfoque orgánico con la filosofía mecanicista. De su estudio de la anatomía de los tiburones dedujo que las glosopetras (supuestas lenguas de serpiente o de aves) eran dientes fosilizados. La geología, que le reconoce como uno de sus fundadores, le debe la elucidación de varios principios básicos de estratigrafía; entre ellos, el de superposición: en una sucesión dada de estratos superpuestos, la capa subyacente a otra debe haberse depositado antes.

Las teorías milenaristas del siglo XVII no recuperan ninguna tradición vinculada a herejías medievales, sino que constituyen una fuerza activa del pensamiento filosófico y científico moderno. Lo recoge Amalia Bettini en su *Cosmo e Apocalisse. Teorie del Millennio e storia della Terra nell'Inghilterra del Seicento*. En buena medida, el núcleo central gira en torno al milenarismo cosmológico defendido por Thomas Burnet en su *Telluris Theoria Sacra: orbis nostri originem et mutationes generales, quas aut subiit aut olim subiturus est complectens*.

Burnet sugiere una interpretación sincrónica del mundo físico y del texto sagrado: Caos, Diluvio, Conflagración y Fin del Mundo son, a su vez, catástrofes que delimitan el ciclo de la Tierra originaria, Tierra actual y Milenio. Teje su discurso con mimbres cartesianos, donde se priman la materia eterna y el movimiento, la teoría de los vórtices y la orientación metodológica general. Nacida del caos, la Tierra sufrió un proceso de acumulación de materia. La materia primigenia, reducida a una sustancia fluida que contenía las partículas elementales de todos los cuerpos, se mezcló en un torbellino gobernado por la ley de la gravedad. Esa masa se distribuyó según la densidad: en el centro se congregaron las partículas más pesadas y en círculos concéntricos se organizaron la masa líquida (el agua) y la volátil (el aire). La parte fluida se dividió en dos estratos: uno oleoso, más ligero, que tendía por tanto a emerger en superficie, y otro subyacente compuesto por agua.

Muy pronto le llueven las críticas. Erasmus Warren atacaba así la argumentación burnetiana: alargaba el tiempo transcurrido desde la creación sin fundamento, no daba una explicación satisfactoria de la fluctuación de las aguas del caos, ni de las leyes que lo gobiernan. La polémica incidió en la consideración de los fósiles. Martin Lister y Edward Lhwyd rechazaban que fueran restos orgánicos. Lister fundaba su razonamiento en la similaridad de la sustancia fósil y la de la roca matriz. ¿Por qué no era el fósil del mismo material que el de las otras conchas? Aceptaba que se trataba de rocas peculiares. Lhwyd propuso que las conchas "podrían deberse en parte a la puesta de peces recibida en las hendiduras y otros meatos de la tierra en el diluvio, que eclosionaron y se desarrollaron en las aguas". Otros se mostraban reacios a aceptar el origen orgánico porque muchos fósiles diferían de los animales y plantas vivos. Si las piedras tuvieran origen orgánico, ello significaría que algunas especies habían desaparecido de la escena, con lo que se violaría el principio de *plenitud*, según el cual Dios había creado un orden natural perfecto en el que cada organismo cumplía una función esencial.

En otro bando, John Woodward defendía que las "piedras formadas" eran restos de partes duras de plantas y animales sacrificados por el diluvio. Robert Hooke coincidía en el origen orgánico, pero se mostraba escéptico respecto al agente diluviano. Por su parte, John Ray valoraba la prueba del origen inorgánico de las "piedras formadas", aunque reconocía su gran semejanza con restos vegetales y animales.

Entre Agricola y la Revolución química del último tercio del XVIII, el concepto de tierra se conjugaba con enorme ambigüedad. Johann Heinrich Pott reconocía cuatro clases de sustancias térreas: calcárea, yeso, arcilla y silícea. Pero el punto de inflexión se produjo en el análisis químico de los minerales esquematizado por T. O. Bergman. Nicholas Desmarest no sólo estableció el origen ígneo de los basaltos de Auvergne, sino que, además, construyó una historia de los flujos de lava. Pero en este dominio de la mineralogía destacó Johann Gottlob Lehmann. Distinguió tres tipos de rocas: primitivas, sedimentarias y volcánicas, que le permitían explicar la secuencia estratigráfica. La obra de Lehmann fue seguida por Georg Christian Füchsel, creador de los primeros mapas geológicos. Observó que los fósiles iban asociados a un estrato particular.

Hacia finales del XVIII, la geología aparece ya como una disciplina bien conformada. En Alemania sobresale la figura de Abraham Gottlob Werner, que desarrolló la clasificación de Lehmann y Bergman. Llamó primarias a las montañas más antiguas (*Urgebirge*) e introdujo una nueva categoría de estrato de "transición" (*Ubergangsgebirge*) que incluía estratos inclinados sin fósiles, por encima de las primarias y debajo de las secundarias. Para el neptunista Werner, la Tierra se formó por agregación de materia a partir de un caos original. Partía de la existencia de un océano primigenio que cubría toda la superficie y rodeaba un interior sólido. Este oceano originario contenía en solución grandes masas de material que cristalizaron en la superficie irregular de las rocas.

En Gran Bretaña, el teórico principal fue James Hutton, quien, aunque no ignoraba los efectos del agua como agente de erosión y deposición, abogó por la importancia decisiva del calor central de la Tierra en los cambios operados en el pasado y los esperables en el futuro. Hutton creía que el interior era caliente y constituía un gran reservorio de combustible. Con el tiempo, y en diferentes lugares, el material interno comenzó a expandirse y obligó a doblarse la corteza superior; unas veces, la roca fundida se

fracturaría hacia la superficie y originaría los volcanes; otras, se limitaría a formar colinas y montes. Desarrolló sus ideas en *Theory of the Earth, with Proofs and Illustrations*.

Es sabido que el camino que condujo a Darwin estaba empedrado por las disputas geológicas entabladas entre 1790 y 1850, período estudiado por Charles C. Gillispie en *Genesis and Geology*. Neptunistas wernerianos se enfrentaban a vulcanistas huttonianos, catastrofistas de Cuvier y diluvistas de Buckland contra uniformitaristas de Lyell. Tales controversias, es la tesis de Gillispie, no representan una enfrentamiento de la ciencia contra la teología, sino que partían de las diferencias religiosas sostenidas por los propios contendientes científicos. En esos años finiseculares los partidarios de la geología neptunista dominaban Europa. Los vulcanistas no comenzaron a gozar de aprecio hasta después de 1810.

De 1820 a 1830, William Buckland se convirtió en el principal arquitecto de la síntesis catastrofista. Al adoptar la dinámica huttoniana y al clasificar sus observaciones de acuerdo con los restos fósiles, creía haber puesto la ciencia sobre una base firme. Pero si Buckland temía que sin cataclismos no había Dios, Lyell no era fundamentalmente menos aprehensivo respecto de que sin uniformidad no había ciencia. Lyell dejó claro ya el sentido de sus ideas en el título del libro: *Principles of Geology, Being an Attempt to Explain the Former Changes of the Earth's Surface, by Reference to Causes Now in Operation*. Construyó su síntesis sobre el condicionamiento metodológico de que el pasado podía sólo estudiarse por analogía con las fuerzas naturales que operaban en el presente.

Carecemos, por lo que respecta a la geología española, de un trabajo que imite, siquiera de lejos, los aquí reseñados. Hay algunas honrosas excepciones, como los estudios de J. M. López Piñero sobre el megaterio. Los más, voluntariosos resúmenes, al estilo del de Sandalio de Pereda en su discurso de contestación al de ingreso de Juan Vilanova y Piera en la Academia de Ciencias. No nos han tratado mejor los extranjeros. El manual clásico de von Zittel apenas se detiene en José Torrubia, para citar apresuradamente a Bowles y Cavanilles. Parece ser que suplir tal deficiencia era la intención abrigada por Francisco Pelayo en *Del diluvio al megaterio*, una obra menor, que se guía, en lo que al contexto concierne, por la *Histoire de la Géologie* de François Ellenberger. En ocasiones con sobrado apego. Dice éste: "Ristoro trata de la causa del Diluvio (efecto de una determinada conjunción de estrellas), considerándolo, por consiguiente, como un acontecimiento natural y no como un milagro obrado directamente por intervención divina sobrenatural". Expone Pelayo: "Para él (Ristoro d'Arezzo), esta catástrofe (el diluvio) no había sido un milagro ni se había debido a una intervención divina, sino que había sido un fenómeno natural provocado por una conjunción de estrellas."

Flojea el libro de Pelayo en la forma y en el fondo. Que se muestra inseguro en la forma se evidencia en el manejo de las fuentes. No me refiero tanto a la pulcritud bibliográfica —por citar algún caso: la obra de Burnet comentada aparece ya como *Theoria Sacra Telluris* ya como *Telluris Teoria* (sic) *Sacra*, o los disparatados *De solidum intra solido*, correctamente citado en la página 60, y *Adversus paganii historiarum libri septem*— cuanto al empleo adecuado de fuentes aquilatadas. Por señalar una de fácil acceso en el CSIC editor: la versión aportada de las *Cuestiones Naturales* de Séneca es traducción del francés cuando desde 1979 se dispone de la espléndida edición crítica de Carmen Codoñer.

Por lo que respecta al fondo, no acierta a enfocar la disputa vulcanismo-neptunismo. Antes, se les escapa que el sentido último de la obra de Torrubia es el problema teológico de los preadamitas, explícito por otro lado en una de las censuras. No le concede ni una línea al *Lapidario* de Alfonso X. ¿Por qué no aludir a la influencia de Andrés del Río en el círculo neptunista de Madrid?

LUIS ALONSO

Matemática

Sin demostración

RAMANUJAN. LETTERS AND COMMENTARY, por Bruce C. Berndt y Robert A. Rankin. American Mathematical Society; Providence, 1995.

El 16 de enero de 1913 Ramanujan escribirá desde Madrás una carta al matemático británico Hardy en la que enumeraba alguno de sus descubrimientos: once páginas de expresiones formales sin demostración o justificación "racional" alguna. El 8 de febrero, Hardy responde agrupando esas fórmulas en tres categorías: resultados ya conocidos o deducibles de otros; resultados nuevos e interesantes, aunque con dificultad en hallar una demostración adecuada; y, finalmente, logros que parecían ser importantes en sí. Importancia condicionada a mostrar los métodos con los cuales se han conseguido las fórmulas y, sobre todo, a dar las demostraciones de las mismas.

Para Hardy, de formación occidental estrictamente académica, matemática equivale a demostración satisfactoria. Sólo cuando una fórmula se ha establecido según la demostración correspondiente, esa fórmula se convierte en teorema; sólo cuando un cálculo se comprueba, tras dar los medios para esa comprobación, se convierte en aproximación de un elemento determinado. Y la carta de Ramanujan sólo contenía fórmulas y conjeturas.

A pesar de lo cual, Hardy reconoce que alguna de esas fórmulas —eliminadas aquellas que eran erróneas y las triviales así como algunos cálculos equivocados— sólo podía haberlas escrito "un matemático de la más alta categoría", "un escritor completamente honrado" porque alguna de esas fórmulas tenía que ser verdadera ya que no habría imaginación alguna para inventarlas sin más.

A la carta de Hardy, Ramanujan contestará con otra colección de fórmulas, conjeturas y cálculos. Entre las dos cartas, un total de 120 fórmulas, de las que podemos espigar el teorema de Ramanujan, las desigualdades de Roger-Ramanujan, fórmulas asintóticas, etcétera. Dos cartas que se han convertido en modelos de creación matemática.

La magnitud de las conjeturas hacen inigualable las dos epístolas de Ramanujan a Hardy. Cartas que dieron paso a dos tipos de resultado: en el plano conceptual, años de esfuerzo y trabajo para lograr la demostración y generalización de alguna de las fórmulas contenidas en ellas. En el plano personal, consiguen que Hardy ayude de modo definitivo a que Ramanujan pueda llegar a Europa y trate de adquirir una formación académica, aceptando ser su tutor en el Trinity de Cambridge.

Desde mi punto de vista, lo importante del libro no se centra de modo exclusivo en las cartas sino también en los comentarios que los

autores realizan. Comentarios que se pueden clasificar en tres niveles muy distintos: En primer lugar, aquellos que examinan cada uno de los teoremas y conjeturas formulados por Ramanujan y trazan tanto su historia como su influencia en el hacer matemático posterior. Para comprobar alguno de los valores numéricos aportados por Ramanujan los autores han empleado programas de ordenador. En segundo lugar, intercalan breves biografías de los personajes mencionados. En tercer lugar, comentarios en torno a las costumbres, alimentación, tipos de religiosidad hindú, que completan el medio cultural en que se desenvolvió.

JAVIER DE LORENZO



Representación de pareja interracial en Nueva España. (Museo Nacional de Historia, México)

Investigación hispanoamericana

En genética

POLIMORFISMO GÉNICO (HLA) EN POBLACIONES HISPANOAMERICANAS. Dirigido por Angel Martín Municio y Pedro García Barreno. Real Academia de Ciencias; Madrid, 1996.

El libro es el resultado final de un proyecto, patrocinado por la Comunidad de Madrid y dirigido por la Real Academia Española de Ciencias, en el que colaboran diferentes científicos españoles y americanos. Estudian los genes HLA en poblaciones hispanoamericanas.

La idea y el impulso originarios se deben al talante de Angel Martín Municio, empeñado en dinamizar la Real Academia de Ciencias y asentar su presencia en América. Para el estudio de los genes HLA de las poblaciones iberoamericanas se contó, por parte española, con los laboratorios de histocompatibilidad del Centro de Transfusiones de la Comunidad de Madrid y del Hospital 12 de Octubre; en este último se celebró, hace años, la primera reunión de contacto con los jefes de los laboratorios hispanoamericanos. Posteriormente, ha habido intercambio de técnicas y muestras, con reuniones y "talleres" de trabajo en Madrid y en capitales hispanoamericanas.

Sin embargo, el libro resultante es la crónica de una muerte anunciada. De los que comenzaron el proyecto, bastantes han quedado descolgados, unos voluntaria y otros involuntariamente. Su trabajo ni se reconoce ni aparece en el volumen. No se menciona el trabajo de Pablo Morales, con su activa participación en el "taller" de Caracas. Tampoco las investigaciones del grupo de José Antonio López de Castro del CSIC y del equipo del Hospital 12 de Octubre, que en los últimos cinco años han obtenido información de interés, describiendo nuevos alelos de HLA en las poblaciones amerindias y llegando a conclusiones imprescindibles para ser reflejadas en este volumen.

En un estudio de este tipo es preciso reconocer las aportaciones de todos y cada uno de los componentes. Es decir, respecto a la autoría del libro, ni son todos los que están, ni están todos los que son: especialistas en campos ajenos al HLA han firmado con soltura capítulos del libro para expertos HLA, en la mejor tradición española del *Buscón* y del *Lazarillo de Tormes*, con suplantación de los científicos que realmente han hecho aportaciones significativas.

En cuanto al contenido del libro, hay una introducción general y otra evolutiva sobre el complejo principal de histocompatibilidad. El mapa de la región HLA en el cromosoma 6 es el que se manejaba hace 15 años: faltan los genes HLA no clásicos de clase I, los DM y muchos otros de la región que hoy están identificados y tienen gran relevancia inmunitaria, como es el gen del TNF. Al hablar de los antígenos HLA-B27 se silencian los trabajos de Carlos López-Larrea, en poblaciones mexicanas, y otros de López de Castro. Sin embargo, estos capítulos introductorios pueden ser de utilidad a no especialistas para iniciarse en el campo del HLA y su relación con la respuesta inmunitaria.

J. L. Vicario nos da una visión general sobre la relación de poblaciones españolas con otras europeas y del resto del mundo en un capítulo completo y bien construido. Las páginas firmadas por antropólogos hispanoamericanos pueden constituir la parte más útil del libro, por su escasa difusión entre nosotros. De interés también la historia y etnografía de las etnias Barí y Warao. Merece destacarse la parte dedicada al mestizaje y la historia de la población mexicana. Z. Layrisse hace una recopilación (no resultado directo del proyecto colaborativo) de sus trabajos y los de otros en poblaciones mexicanas y venezolanas, tanto mestizas como indígenas; la conclusión final se refleja en el dendrograma de emparentamiento entre españoles, venezolanos, mexicanos y amerindios Warao, Barí-Motilones y Lacandones. El capítulo de C. Gorodezlly sobre diabetes mellitus tipo I y su relación con HLA es muy pertinente, pues en la población mexicana mestiza los genes HLA de predisposición a la enfermedad son de origen español y los HLA portadores de origen mexicano.

ANTONIO ARNÁIZ VILLENA

IDEAS APLICADAS

Merton Bunker, Jr.

Detectores de humo

A finales de los años treinta, Walter Jaeger, físico suizo, trataba de dar con un sensor de gas tóxico. Para ello confiaba en que el gas que penetrase en el sensor se adhiriera a las moléculas de aire ionizadas, alterando de ese modo la intensidad de la corriente eléctrica que pasaba por un circuito incluido en el instrumento. Pero fracasó: las pequeñas concentraciones de gas no surtían efecto en la conductividad del sensor. Frustrado, Jaeger encendió un cigarrillo y no tardó en comprobar con sorpresa que el indicador del instrumento registraba una caída de corriente. Manifiestamente, las partículas de humo conseguían lo que se le negaba al gas tóxico.

El experimento de Jaeger fue uno de los adelantos que prepararon el terreno para los detectores de humo modernos. Pero tuvieron que pasar 30 años para que los progresos en química nuclear y electrónica del estado sólido hicieran posible un sensor de precio económico. Los primeros detectores de humo comerciales aparecieron en 1969.

Los detectores de humo se agrupan en dos grandes categorías. Los detectores de ionización, los más corrientes, disparan una alarma cuando las partículas de humo se adhieren a las moléculas de aire ionizadas. En contraste, los detectores fotoeléctricos detectan la luz que dispersan las partículas de humo recogiéndola en una fotocélula, con lo que se activa una alarma. En otro tipo de dispositivo fotoeléctrico, el humo obstaculiza el paso de un haz luminoso y, en este caso, es la reducción de la luz que llega a una fotocélula lo que dispara la alarma.

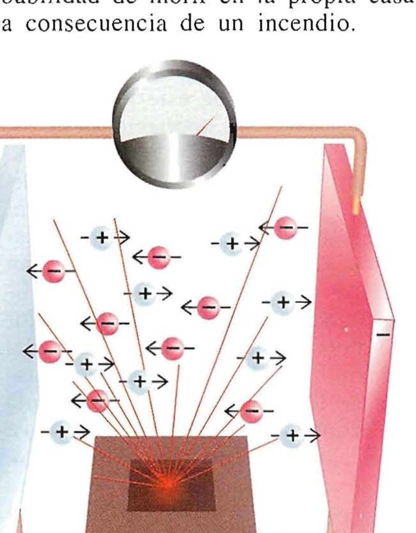
Los detectores de ionización reaccionan más rápido a los incendios con llama que los fotoeléctricos, y éstos perciben mucho antes los incendios sin llama. Algunos productos comerciales ya se ofrecen equipados con ambos. Para recintos tales como cocinas, donde los humos pueden generar falsas alarmas, son más adecuados los sensores térmicos, consistentes en un conmutador que activa una alarma cuando se llega a cierta temperatura.

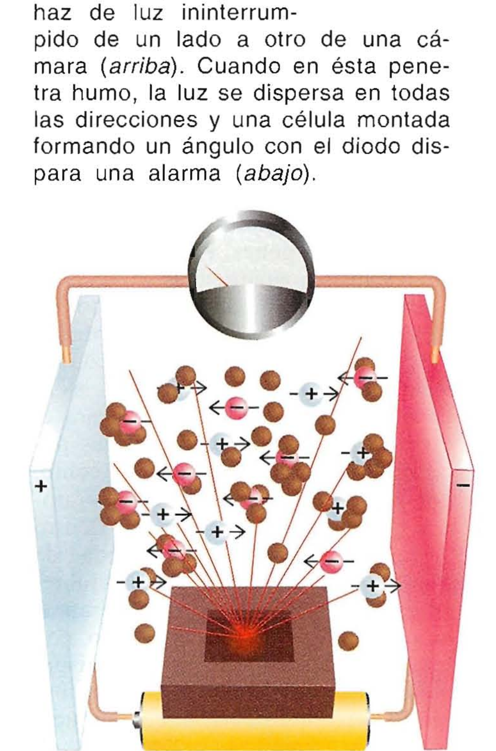
La técnica simplicísima de la detección de incendios ha seguido refinándose. Existen alarmas equipadas con luces estroboscópicas para avisar a las personas con defectos de audición. Todas estas medidas han contribuido a una estadística alentadora: los detectores de humo han reducido aproximadamente a la mitad la probabilidad de morir en la propia casa a consecuencia de un incendio.

DIODO

FOTOCELULA

EL DETECTOR FOTOELECTRICO funciona merced a un diodo emisor de luz que envía un haz de luz ininterrumpido de un lado a otro de una cámara (*arriba*). Cuando en ésta penetra humo, la luz se dispersa en todas las direcciones y una célula montada formando un ángulo con el diodo dispara una alarma (*abajo*).





EL DETECTOR DE IONIZACION actúa ionizando las moléculas del aire (*esferas rosas y azules*) con partículas alfa procedentes de un material radiactivo, americio 241 (*líneas rojas*). Así, los iones transportan una pequeña corriente entre dos electrodos (*izquierda*). Las partículas de humo (*esferas marrones*) se adhieren a los iones (*derecha*), con lo que se reduce la intensidad de la corriente y se activa una alarma.